ELEKTRIE

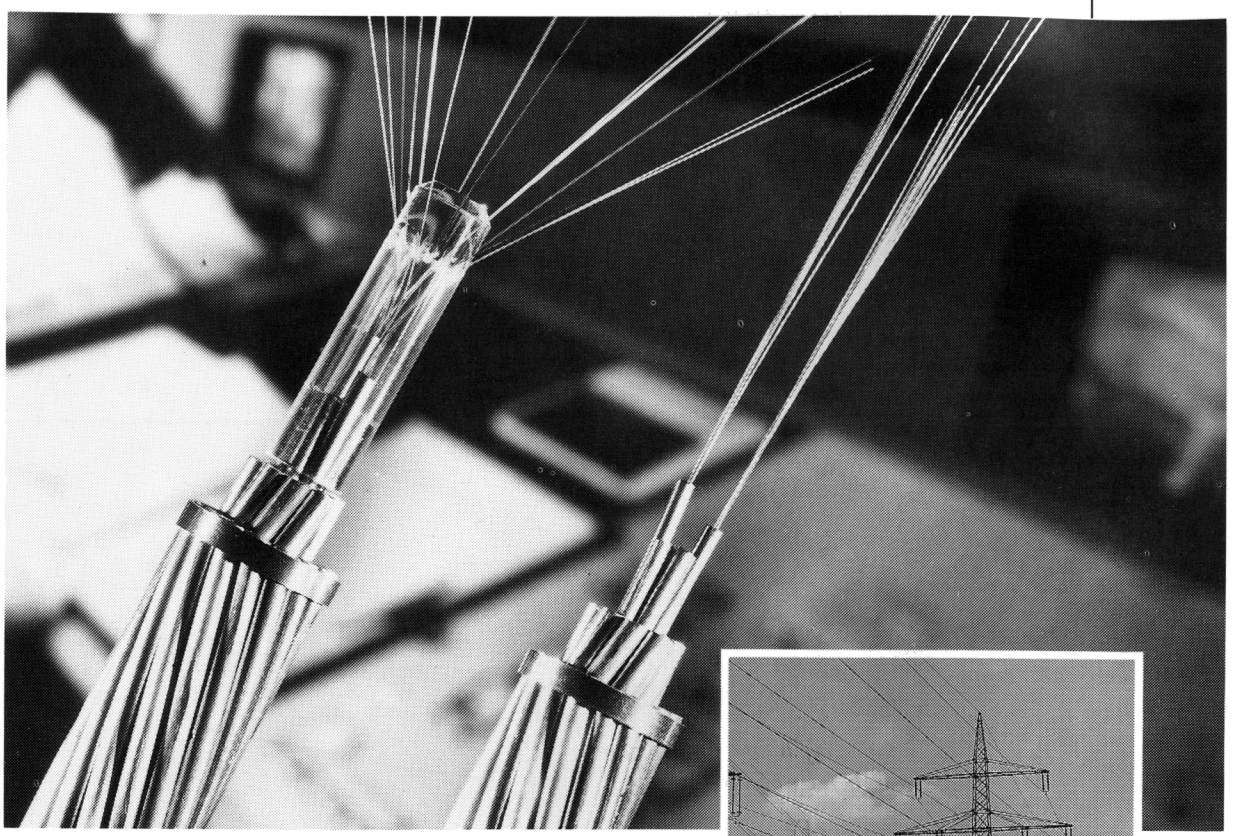
# ELEKTRIE 12190

Verlag Technik GmbH • ISSN 0013 - 5399

## Anlagenrekonstruktion Innovation

0120241

# *Ein Erdseil mit integrierter Zukunft...*



*Lichtwellenleiter-Erdseil (LES) von F&G mit 16 integrierten Lichtwellenleitern für die daten- und kommunikationstechnischen Anforderungen von morgen*

E29.1d 5.1

Für den zunehmenden Bedarf an Übertragungs- und zentralen Steuerungs-Kapazitäten, für den kontinuierlichen Daten- und Informationsaustausch über EVU-eigene Kommunikations-Netze haben wir jetzt ein neues Lichtwellenleiter-Erdseil (LES) entwickelt.
Dieses neue Erdseil kann mit Hilfe von zwei mitverseilten Edelstahlröhrchen bis zu 16 Lichtwellenleiter aufnehmen. Damit besitzt das neue Erdseil eine Übertragungskapazität, die den nachrichtentechnischen Anforderungen bis weit in die Zukunft gerecht wird.
Neben der hohen Übertragungskapazität bietet das Lichtwellenleiter-Erdseil von F&G weitere entscheidende Vorteile:

- Die Erdseil-Konstruktion entspricht der der normalen Freileitungs-Erdseile – das bedeutet: gleiche Durchmesser, gleiches Gewicht. Somit ist keine neue Maststatik bei der Umrüstung erforderlich.
- Ein ausgereiftes Garnituren-Programm und eine erprobte Installationstechnik stehen zur Verfügung.

Schreiben Sie uns oder rufen Sie uns einfach an, wenn Sie mehr über das neue, leistungsstarke Lichtwellenleiter-Erdseil von F&G erfahren möchten. Unsere Fachleute stehen Ihnen für Informationen, Beratung und Projektierung zur Verfügung.

**F&G – innovativ in die Zukunft**

*FELTEN & GUILLEAUME ENERGIETECHNIK AG*
Geschäftsgebiet Metalle
Postfach 80 50 01, D-5000 Köln 80

Telefon (0221) 676-0
Telefax (0221) 676-24 22
Telex 887 787-13 fg d

Ja, senden Sie uns weiteres Informationsmaterial zum Thema LES zu.

Name

Firma

Straße

Ort

Telefon

ISSN 0013-5399
44. Jahrgang

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik

# ELEKTRIE 12/90

Redaktionsbeirat
Vorsitzender:
Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:
Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. Dr. h. c. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Obering. K. Friedel · Prof. Dr. sc. techn. J. Hoffmann · Dipl.-Ing. H. Kabisch · Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. e. h. R. Lappe · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e. h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass · Prof. Dr.-Ing. habil. G. Wunsch

Korrespondenten
Dr.-Ing. K. Hannella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden

**Titelbild**
Meßplatz bei EMV-Prüfungen in einer 220-kV-Schaltanlage in Tandembauweise. Im Hintergrund ist ein Trenner der Fa. Siemens AG zu sehen.
Siehe auch Beitrag auf den Seiten 463–469.

**Verlag Technik GmbH Berlin**

## Inhalt

**Aktuelle Information** 442
Ambrosch, H.
**Rekonstruktion von 220-kV- und 380-kV- Freiluftschaltanlagen – ein Beitrag zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit** 443

## Fachaufsätze

Schwirkslies, W.; Ambrosch, H.; Jäger, J.; Veuhoff, F.-W.
**Anforderungen an das Schaltvermögen von Trenn- und Erdungsschaltern in Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen** 444
Krause, D.
**Ultraschalldiagnose an Langstabisolatoren und Geräteporzellanen zur Früherkennung von Porzellanfehlern im Bereich der Armierung** 447
Berthold, St.; Bauer, H.
**Schaltgeräteorientierte und pfadorientierte Schaltfehlerschutzsysteme für Hochspannungs-Schaltanlagen** 450
Bäsel, G.; Feist, D.; Hühr, L.
**Neuer Schaltfehlerschutz in der 220-kV-Schaltanlage Lubmin** 456
Bauer, H.; Diessner, A.; Schwirkslies, W.
**Störbeeinflussungsmessungen an Steuerkabeln einer 220-kV-Schaltanlage zur Abschätzung der EMV beim Einsatz mikroelektronischer Geräte** 463
Ambrosch, H.; Ebner, M.
**Elektrische Belastung der Schaltstreckenisolierung von Hochspannungs-Leistungsschaltern im ausgeschalteten Zustand** 470
Zedler, H.-D.; Pliet, H.; Schramm, H.-H.
**Prüfung von $SF_6$-Leistungsschaltern bei extremer Spannungsbelastung** 475
Grabner, U.; Sidorf, W.; Eggert, H.
**Austausch von Schaltgeräten 245 und 420 kV** 481
Pilling, J.; Kynast, E.; Berndt, L.
**Zur Dimensionierung von Isolatoren für Hochspannungsgeräte unter Fremdschichteinfluß** 486
Ambrosch, H.; Gorgius, D.
**Einfluß von stromstarken Vorentladungen auf Kittsysteme von Freiluftisolatoren** 489

## Umschau

**Produktinformation** 493
**Fachtagung** 495

# AKTUELLE INFORMATION

## 2. Berliner UNIX-Forum

Zeit: 11. bis 12. Februar 1991
Ort: ICC Berlin
Veranstalter: IDG World Expo Corporation, Framingham/USA und die UniWare Computer GmbH, Berlin
Inhaltliche Schwerpunkte
Informationsvermittlung in den Bereichen
- Standardisierung
- Office-Systeme,
- verteilte Systeme und
- objektorientierte Programmsprachen.

Im Rahmen des 2. Berliner Unix-Forums wird die Jahrestagung 1991 der EAG – Entwickler und Anwendungsgemeinschaft durchgeführt.

**Anfragen**
UniWare Computer GmbH
Kantstraße 152
W-1000 Berlin 12
Telefon: 4930/3100 09-246
Die Redaktion EK 4337

## Mikroelektronik
*GME-Fachtagung*

Zeit: 4. bis 6. März 1991
Ort: Baden-Baden
Veranstalter: VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik (GME), Informationstechnische Gesellschaft im VDE (ITG) in Zusammenarbeit mit der Deutschen Sektion des IEEE
Inhaltliche Schwerpunkte
Bild und Sprachverarbeitung
- Systemanforderungen und Realisierung
- Entwurfmethodik
- Schaltungstechnik
- ASICs
- Sensoren und Signalverarbeitung

CAD-Werkzeuge
- IC-Entwurf auf funktionaler Ebene

Prozeßintegration
- für unterschiedliche Technologien (CMDS, Bipolar, BICMOS, GaAs)
- für unterschiedliche Schaltungstypen (Speicher, Logik, ASICs, usw.)

**Anfragen**
VDE-Zentralstelle Tagungen und Seminare
Stresemannallee 15
W-6000 Frankfurt am Main 70
Telefon: (069) 6308-202
Telefax: (069) 631 29 25
Die Redaktion EK 4284

## VDE-Fachtagungen und Tagungen unter Beteiligung des VDE (Auswahl)

März 1991 Aachen — **Thermische Strömungsmaschinen: Zustandsdiagnose und Fehlerfrüherkennung an Turbomaschinen**
*GET/ETG-Fachtagung*

25.–28. 3. 1991 Edinburgh — **International Conference on Control '91**

April 1991 — **Thermische Strömungsmaschinen: Ventilatoren '91**
*GET/ETG-Fachtagung*

15.–18. 4. 1991 München — **ETC '91**
*2nd European Test Conference*

22.–26. 4. 1991 Lüttich — **CIRED '91**
*11th International Conference on Electricity Distribution*

2.–3. 5. 1991 Schliersee — **Schliersee-Tagung**
*Gemeinschaftstagung der ETG, GET, FfE und GFPE*

Juni 1991 Essen — **Kraft-Wärme/Kälte-Kopplung in Industrie, Gewerbe und Dienstleistungsunternehmen**
*GET/ETG-Fachtagung*

4.–5. 6. 1991 München — **Tagung Technische Zuverlässigkeit (TTZ) 1991,**
*ITG-Symposium*

September 1991 — **ESSDERC '91**
*21st European Solid-State Device Research Conference*

September 1991 — **ESSCIRC '91**
*17th European Solid-Stats Circuits Conference*

September 1991 — **Rationelle Datenverarbeitung in der Energietechnik**
*GET/ETG-Fachtagung*

3.–4. 9. 1991 Frankfurt — **100 Jahre Drehstromübertragung**
*Jubiläumsveranstaltung mit ETG-Fachtagung, Kolloquium und Ausstellung*

10.–13. 9. 1991 Baden-Baden — **SAFEPROCESS '91**
*IFAC-Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*

**Anfragen**
VDE-Zentralstelle Tagungen und Seminare
Stresemannallee 15
W-6000 Frankfurt 70
Telefon: (069) 630 82 02 + 321
Die Redaktion EK 4321

Tagungen der Wissenschaftlich-Technischen Gesellschaft für Meß- und Automatisierungs-Technik (WGMA)

**Kommunikationssysteme**
*Messekongreß*
Zeit: 21.–23. 3. 1991
Ort: Leipzig, Kinosaal

**Rechnergestützte Qualitätssicherung**
*Internationale Konferenz*
Zeit: 9.–11. 4. 1991
Ort: Erfurt

**Symposium zur Organisationsprojektierung**
Zeit: 28.–29. 5. 1991
Ort: Leipzig, Leipzig-Information

**Prozeßsicherung im automatischen Betrieb**
*Symposium*
Zeit: 19.–20. 6. 1991
Ort: Magdeburg, Kino

**4. Internationale Konferenz Automatische Bildverarbeitung**
Zeit: 17.–19. 9. 1991
Ort: Dresden, Haus der Kultur und Bildung

**14. Wiss.-tech. Konferenz Automatisierungstechnik**
Zeit: 16.–17. 10. 1991
Ort: Berlin

**Communication in Manufacturing Automation**
*Workshop on Man-Machine*
Zeit: Okt. 1991
Ort: Berlin

**Jahrestagung der WGMA**
Zeit: 14.–15. 11. 1991
Ort: Halle

**Grundlagen der Modellierung und Simulationstechnik**
*20. Jahrestagung*
Zeit: 10.–12. 12. 1991
Ort: Rostock, Universität

**Anfragen**
WGMA in der KDT
PSF 1315
O–1086 Berlin
Telex: 011 4841 techkammer
Telefax: 2265256, 2265296
Die Redaktion EK 4345

## Zuverlässigkeit elektrischer Energieversorgungssysteme
*CIGRE-Symposium*

Zeit: 16. bis 18. September 1991
Ort: Montreal (Kanada)
Veranstalter: CIGRE in Zusammenarbeit mit dem kanadischen Nationalkomitee
Inhaltliche Schwerpunkte
- Konzepte, Ziele und Modelle der Systemzuverlässigkeitsberechnung
- Einfluß der Komponentenzuverlässigkeit auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsytems
- Steigerung der Systemzuverlässigkeit durch Überwachungseinrichtungen, Netzverbund und andere spezielle Einrichtungen
- Probleme aus dem Zusammenschluß von Netzen unterschiedlicher Zuverlässigkeitsphilosophie
- Meßmethoden zur Systemzuverlässigkeit
- Einfluß von Instandhaltungs- und Betriebsführungskonzepten auf die Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems

**Anfragen**
Deutsches Komitee der CIGRE beim VDE
Stresemannallee 15
W–6000 Frankfurt am Main 70
Telefon: (069) 6308-235
Telex: 4-12871 vdetz
Die Redaktion EK 4286

# Rekonstruktion von 220-kV- und 380-kV-Freiluftschaltanlagen

## – ein Beitrag zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit

Von Prof. Dr. sc. techn. Helmut Ambrosch, Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik, Institut für Elektroenergieversorgung, Leiter des Lehrstuhls Elektroenergieanlagen
Vorsitzender des FUA „Hochspannungsschaltgeräte und -anlagen" der KDT

Hochspannungsschaltanlagen werden für eine Nutzungsdauer von 25 bis 30 Jahren ausgelegt. Gebäude, Fundamente, Portale, Gleise usw. haben bei ordnungsgemäßer Wartung meist eine weit größere Nutzungsdauer. Spätestens am Ende der Nutzungsdauer der Hauptausrüstungen, z. B. Transformatoren, Wandler, Hochspannungsschaltgeräte oder wichtiger Schutz- und Steuereinrichtungen, steht der Betreiber von Hochspannungsschaltanlagen vor der Entscheidung einer teilweisen oder generellen Rekonstruktion der Schaltanlage oder deren Neubau.
Häufig müssen Hauptausrüstungen bereits vor Ablauf ihrer normalen Nutzungsdauer ausgewechselt werden, z. B. bei abnormalem elektrischen oder mechanischen Verschleiß, aber auch dann, wenn sich die netztechnischen Anforderungen, das Betriebsregime oder die Umweltbedingungen stark verändert haben.
Zu den netztechnischen Anforderungen zählen:

- elektrische Belastungen durch Betriebs- und Kurzschlußströme,
- Zuverlässigkeitsanforderungen in bezug auf schwere oder leichte Fehler,
- Änderungen der Verknüpfungsforderungen, z. B. Netzlänge bzw. -quertrennung, Erhöhung der Anzahl der Sammelschienen oder spezielle Schaltvarianten zur Umgehung nicht verfügbarer Leistungsschalter.

Zu den Anforderungen aus der Sicht des Betriebsregimes gehören:

- Erhöhung des Automatisierungsgrades, z. B. Fernsteuerung und Fernparametrierung des Netz- und Anlagenschutzes,
- Erhöhung der Handlungssicherheit des Personals, z. B. durch Einsatz eines umfassenden, Kupplung(en) und Transformatoren übergreifenden Schaltfehlerschutzes und durch optimal gestaltete Wartentechnik mit Integration von Ratgeberfunktionen,
- Erhöhung des Sicherheitsbedürfnisses bei schweren Fehlern in der Schaltanlage für Mensch und Tier, die Schaltanlage selbst (Nachbarfelder) und das Elektroenergiesystem,
- Verringerung des Wartungsaufwandes.

Bei den Umweltbedingungen können sich unter anderem folgende Faktoren verändern:

- Fremdschichtbelastung,
- Toleranz der Transformatoren- und Schaltgerätegeräusche,
- Toleranz der ästhetischen Einordnung in die natürliche und gebaute Umwelt.

Die Ursachen und Einflußfaktoren, die eine Schaltanlagenrekonstruktion erforderlich machen, können sehr vielfältig sein. Die Beurteilung des aktuellen Anlagenzustandes und der Umweltbedingungen sowie eine sorgfältig geführte und ausgewertete Fehlerstatistik sind ganz wesentliche Voraussetzungen zur Bestimmung sowohl des Zeitpunktes als auch des Umfangs einer Rekonstruktion.
Umfang und technologischer Ablauf einer Rekonstruktion können meist nur spezifisch für jede Schaltanlage und abhängig von deren Aufgabe im Elektroenergiesystem bestimmt werden. Der Strategienvorrat reicht z. B. von wenigen Baustufen mit großen Einschränkungen für den Netzbetrieb bis zur feldweisen Rekonstruktion, also vielen Baustufen mit wenig Einschränkungen für den Netzbetrieb. Oft sind weitere Randbedingungen zu beachten. In den Beiträgen dieses Heftes wird über Teilaufgaben bei der Vorbereitung und Durchführung der Rekonstruktion von 220-kV- und 380-kV-Freiluftschaltanlagen berichtet. Die Rekonstruktion umfaßte den Austausch der Druckluftleistungsschalter gegen $SF_6$-Schalter, den Austausch der Trenn- und Erdungsschalter mit Druckluftantrieb gegen solche mit Motorantrieb und den Austausch der Druckluftsteuergeräte gegen Steuergeräte mit mikroelektronischem Schaltfehlerschutz.
Ausgehend von einer Analyse der Aufgaben des Schaltfehlerschutzes, der elektrischen Belastung und des Isoliervermögens der Leistungsschalter im ausgeschalteten Zustand sowie der Anforderungen an das Schaltvermögen von Trenn- und Erdungsschaltern werden technische und technologische Lösungen vorgestellt. Es wird die Erprobung der neuen Technik im Labor, im Prüffeld und vor Ort ausgewertet. Die meisten Ergebnisse sind verallgemeinerungsfähig und stellen einen Beitrag zur generellen Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Hochspannungsschaltanlagen dar.

EK 4357

# Anforderungen an das Schaltvermögen von Trenn- und Erdungsschaltern in Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen

**W. Schwirkslies, Greifswald; H. Ambrosch, Dresden; J. Jäger, Berlin; F.-W. Veuhoff, Berlin**

Trenn- und Erdungsschalter gehören nach ihrem konstruktiven Aufbau zu den einfachsten Schaltgeräten. Sie haben beim Freischalten von Betriebsmitteln für den Schutz des Personals und als Trennstrecken zwischen unter Umständen asynchronen Netzen für den Betrieb von Elektroenergiesystemen große Bedeutung. Hinzu kommt, daß die Trennschalter im Sammelschienenbereich (ausgenommen die sog. Scheren- oder Greifertrenner) einer Wartung nur nach Freischaltung eines ganzen Netzknotenpunktes (Sammelschiene oder Sammelschienenabschnitt) zugängig sind. Die Forderungen an Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit sind also sehr hoch (Bild 1).

Der ein- oder beidseitige Anbau von Erdungsschaltern wird durch die Einordnung in die Grundschaltung einer Schaltanlage bestimmt.

Die elektrischen Anforderungen an Trenn- und Erdungsschalter im geöffneten und geschlossenen Zustand sind seit vielen Jahren eindeutig definiert und nicht Gegenstand der nachfolgenden Überlegungen. Nicht betrachtet werden außerdem Erdungsschalter mit Einschaltvermögen (Schnellerder oder Kurzschließer).

Mit zunehmender Nennspannung und größer werdenden Anlagenumfang (Anzahl der Schaltfelder) sowie beim Vorhandensein langer und in der Regel auf einem Mast parallel geführter Freileitungen wachsen die Anforderungen an das Ein- und/oder Ausschaltvermögen der Trenn- und Erdungsschalter. Mit diesem Problem beschäftigte sich seit einigen Jahren eine Arbeitsgruppe der IEC. Die bisherigen Arbeitsergebnisse wurden in Entwürfen zur Präzisierung des IEC-Dok. 129 (1984) [1] bis [3] zusammengefaßt.

Für die Rekonstruktion je einer größeren 220-kV- und 380-kV-Schaltanlage galt es zu überprüfen, welche Forderungen in bezug auf das Schaltvermögen an Trenn- und Erdungsschalter in diesen Anlagen zu stellen sind. Die Eignung der ausgewählten Geräte sollte durch entsprechende Prüfungen nachgewiesen werden.

## 1. Anforderungen an das Schaltvermögen von Trennschaltern

In IEC-Dok. 129 (1984) [1] und daraus abgeleiteten nationalen Standards wird ausgesagt, daß Trennschalter-Stromkreise nur öffnen und schließen können, wenn ein vernachlässigbarer Strom aus- oder eingeschaltet wird, oder wenn keine wesentliche Änderung der Spannung zwischen den Anschlüssen jedes der Pole eines Trennschalters auftritt.

Bei Nennspannungen bis 420 kV wird ein Strom nicht über 0,5 A als vernachlässigbarer Strom angesehen.

Das Schaltvermögen von Trennschaltern wird von deren Konstruktion stark beeinflußt.

Dipl.-Ing. *Wilfried Schwirkslies*, Energiewerke Nord AG, KKW Greifswald; Prof. Dr. sc. techn. *Helmut Ambrosch*, Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik; Dipl.-Ing. *Jürgen Jäger*, Siemens AG, Schaltwerk Berlin; Dipl.-Ing. *Friedrich-Wilhelm Veuhoff*, Siemens AG, Schaltwerk Berlin

### 1.1. Schalten kleiner kapazitiver Ströme

Je nach Länge der Verbindungsleitungen innerhalb eines Schaltfeldes (z. B. Schaltfeldüberspannungen bei Tandembauweise) und je nach Grundschaltung der Schaltanlagen (Bild 2) werden auch Sammelschienen- oder Umgehungsschienenabschnitte ein- oder ausgeschaltet. Die zu schaltenden stationären Ströme werden durch die Betriebskapazität bestimmt und betragen

$$I_C = U_{LE}\,\omega\,c_b'\,l \qquad (1)$$

Für 220-kV- und 380-kV-Anlagen beträgt $c_b' \approx 12\,\mathrm{pF/m}$. Das bedeutet in einer 220-kV-Schaltanlage mit einer Feldüberspannung von z. B. 100 m einen Ladestrom von $I_C = 0{,}05$ A und in einer 380-kV-Anlage bei einer Länge von 150 m $I_C = 0{,}14$ A. Diese stationären Ströme sind unproblematisch. Bedeutung haben dagegen die hochfrequenten Ausgleichsströme und -spannungen, die bei der raschen Folge von Impulsentladungen beim Schließen und Öffnen des Trennschalters entstehen. Der Durchbruch der Gasstrecke erfolgt im Nanosekundenbereich. Diese Folge von Entladungen ist

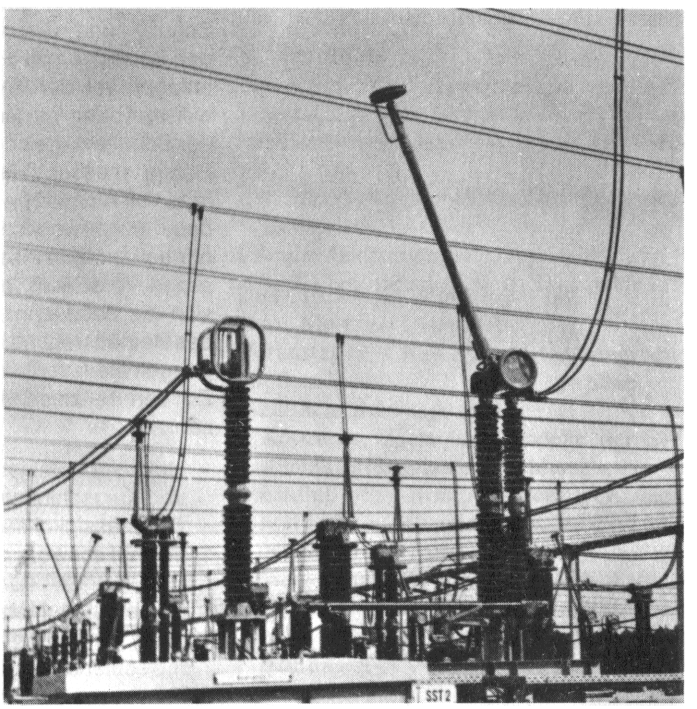
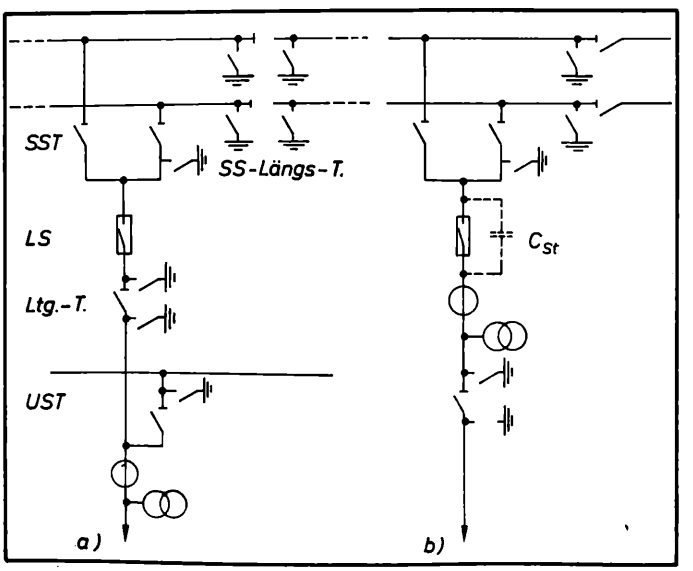


**Bild 1.** Sammelschienentrennschalter in einer 220-kV-Schaltanlage in Tandembauweise (Endfeld)

**Bild 2.** Grundschaltungen eines Abzweiges in einer Hochspannungsschaltanlage
a) mit Umgehungsschiene (Versuchsanlage)
b) ohne Umgehungsschiene



optisch wahrnehmbar, hörbar und beeinflußt durch die hohe Stromanstiegssteilheit über Feldkopplung und Erdpotentialanhebung alle Meß-, Melde-, Steuer- und Hilfsenergieleitungen. Bei Einsatz mikroelektronischer Baugruppen in diesem Bereich bedarf es besonderer Schutzmaßnahmen. Über entsprechende Versuche in einer 220-kV-Schaltanlage wird im gleichen Heft berichtet [4].
Für die Isolierung der Hochspannungsgeräte und -anlagen sind die transienten Impulsspannungen unkritisch. Verschleiß an den Trennschalterkontakten war nach einer größeren Anzahl von Schaltversuchen nicht nachweisbar. Außerdem befanden sich die Fußpunkte in keinem Fall im Betriebsstrombereich des Kontaktsystems, sondern stets an den Steuerelektroden bzw. an den Enden der Fingerkontakte und am Verklinkungsbügel (Bild 3). Bei Anordnung der Strom- und Spannungswandler zwischen Leistungsschalter und Leitungstrenner (bei Anlagen ohne Umgehungsschienen) und Leistungsschaltern mit Steuerkondensatoren (Bild 2b) können je nach Parameter der Wandler und der Größe der Steuerkondensatoren wesentlich kompliziertere Ausgleichsvorgänge entstehen, die hier nicht näher betrachtet werden.

### 1.2. Schalten von Kommutierungsströmen beim Sammelschienenwechsel

Beim Sammelschienenwechsel (Bild 4) ist nach Einschaltung des Kuppelleistungsschalters zwischen den Schienen 1 und 2 das Schließen des Trenners 2 zulässig. Die Potentialdifferenz über dem Trenner 2 vor dem Schließen wird bestimmt durch den Spannungsabfall zwischen den Punkten A und B und berechnet sich zu

$$U_{AB1} = Z_1 I_b \text{ (Tr. 1 geschlossen, Tr. 2 geöffnet)} \quad (2)$$

Nach Schließen des Trenners fließen über die parallel geschalteten Impedanzen $Z_1$ und $Z_2$ die Ströme $I_1$ und $I_2$

$$I_1 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} I_b \quad (3)$$

$$I_2 = I_b - I_1 \quad (4)$$

$Z_1$ Impedanz des Stromweges AB über Trennschalter 1
$Z_2$ Impedanz des Stromweges AB über Kupplung und Trennschalter 2.
Nach [5] lassen sich die Höchstwerte der Kommutierungsbeanspruchungen beim Öffnen des Trenners 1 abschätzen nach

$$I_1 \approx 0{,}8\, I_b \quad (5)$$

$$\Delta U_{AB2} \approx k \cdot a \cdot I_b \text{ (Tr. 1 geöffnet, Tr. 2 geschlossen)} \quad (6)$$

$$k = 0{,}7 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{m}$$

$a$ Abstand zwischen betrachtetem Schaltfeld und Kupplung.
Die Lichtbogenbelastung des Kontaktsystems muß insbesondere beim Ausschalten des vor dem Sammelschienenwechsel in Betrieb befindlichen Sammelschienentrenners (Tr 1 in Bild 4) überprüft werden. Nach IEC [2] werden folgende Werte empfohlen:

| $I_K$ | $\Delta U$ |
|---|---|
| $0{,}8\, I_n$ | 100 V für 100–170 kV |
| (max. 1600 A) | 200 V für 245–362 kV |
| | 300 V für 420–765 kV |

Wegen der vielfältigen Möglichkeiten der Sammelschienenanordnungen in Freiluftschaltanlagen sind die eine Einschwingspannung bestimmenden Parameter nicht exakt festzulegen. Die Forderungen beschränken sich daher auf einen Amplitudenfaktor von $k$ = 1,5 und eine Einschwingfrequenz größer $f_e$ = 10 kHz. Da beim Öffnen des Trennschalters ein Lichtbogen gezogen wird, ist mit einer Beeinflussung der wiederkehrenden Spannung durch die dabei auftretende Lichtbogenspannung zu rechnen. Diese Lichtbogenspannung bewirkt eine Dämpfung der wiederkehrenden Spannung und Phasenverschiebung des Stromes, so daß der Strom und die Prüfspannung nahezu in Phase liegen.
Für eine Typprüfung sind 100 Schaltspiele ohne unzulässigen Verschleiß an den stromführenden Kontakten nachzuweisen. Der Prüfkreis zur Einhaltung der geforderten Strom- und Spannungswerte sowie der transienten wiederkehrenden Spannung ist ein induktiver Kreis mit einem Leistungsfaktor cos $\varphi \leq 0{,}15$. Durch zweckmäßige Gestaltung des für 245-kV- und 420-kV-Trennschalter gleichen Kontaktsystems konnten für die ausgewählten Trennschalter im Prüffeld 100 Schaltspiele bei $\Delta U$ = 300 V und $I$ = 1630 A ($I_n$ = 2000 A) nachgewiesen werden.

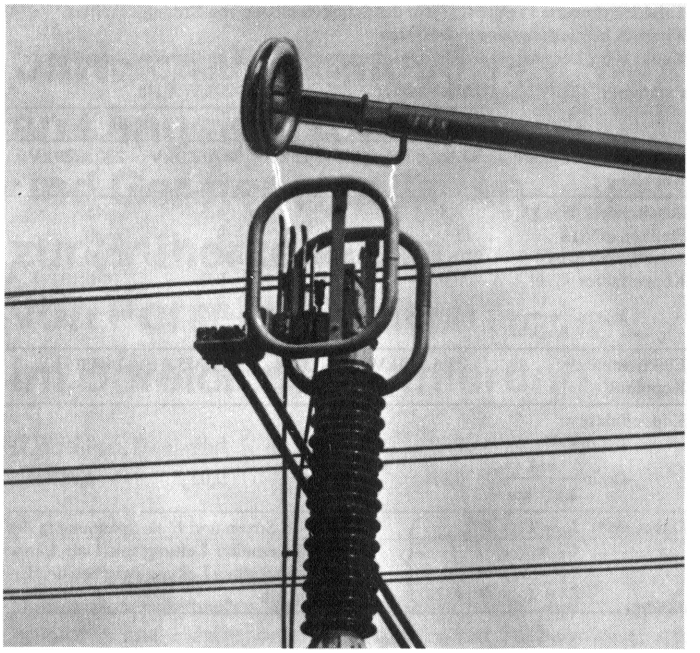
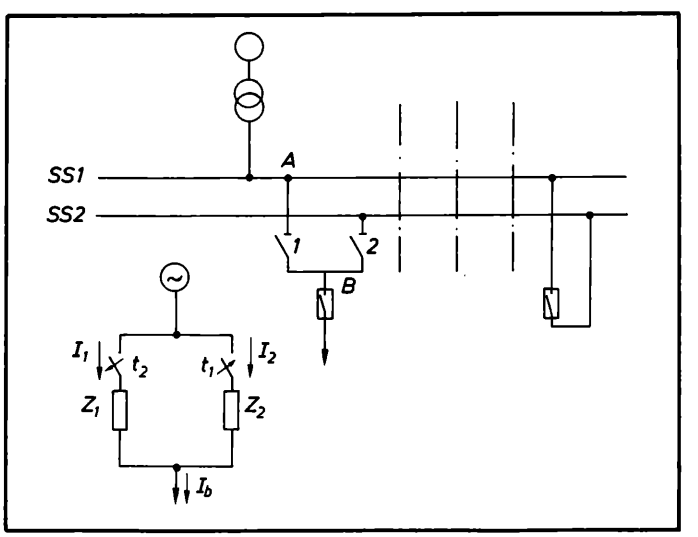


**Bild 3.** Impulsentladungen beim Öffnen eines 245-kV-Trennschalters

## 2. Anforderungen an das Schaltvermögen von Erdungsschaltern

Erdungsschalter haben die Aufgabe, Elemente einer Schaltanlage, an denen Wartungsarbeiten durchgeführt werden, zu erden. Unter abnormalen Bedingungen, z. B. bei einer Fehlhandlung, müssen sie während einer festgelegten Zeit Kurzschlußströmen standhalten [1].
Zur elektrischen Belastung beim Öffnen und Schließen wurden bis vor wenigen Jahren keinerlei Forderungen erhoben, obwohl dem Schaltpersonal das Entladungsgeräusch beim Schließen des Erdungsschalters einer Leitung (vergleichbar mit den Impulsentladungen beim Öffnen und Schließen eines Trennschalters), und die Lichtbogenerscheinung beim Öffnen des Erdungsschalters bei ei-

**Bild 4.** Grundschaltung und Ersatzschaltbild zur Bestimmung der elektrischen Belastung der Trennschalter beim Sammelschienenwechsel
$Z_1$ – Impedanz A – B über Trennschalter 1
$Z_2$ – Impedanz A – B über Kupplung und Trennschalter 2



**Tafel 1.** Prüfwerte nach IEC [3] für das Schaltvermögen von Erdungsschaltern
Klasse A bei Leitungslängen bis 50 km
Klasse B bei Leitungslängen bis 200 km und mittleren bis großen Kopplungsfaktoren

| Parameter | 245 kV/50 Hz | | 420 kV/50 Hz | |
|---|---|---|---|---|
| | A | B | A | B |
| Elektromagnetische Kopplung | 80 A/2,0 kV | 180 A/15 kV | 80 A/2,0 kV | 200 A/20 kV |
| Scheitelwerk $U$ in kV | 2,3 | 34 | 4,5 | 45 |
| Steilheit in V/μs | 11 | 34 | 9 | 30 |
| Anstiegszeit in μs | 210 | 1000 | 500 | 1500 |
| Koppelfaktor $k_{LI}$ in A/A | 0,05 | 0,15 | 0,03 | 0,10 |
| $k_{LV}$ in $\frac{V}{A \cdot km}$ | 0,03 | 0,06 | 0,02 | 0,03 |
| Elektrostatische Kopplung | 1,25 A/5,0 kV | 10 A/15 kV | 1,25 A/5,0 kV | 15 A/15 kV |
| Koppelfaktor | | | | |
| $k_{CV}$ in V/V | 0,20 | 0,40 | 0,10 | 0,20 |
| $k_{CI}$ in $\frac{mA}{kV \cdot km}$ | 0,05 | 0,10 | 0,02 | 0,05 |

Dabei sind $I_L = k_{LI} \cdot I$, $U_L = k_{LV} \cdot I \cdot l$, $U_C = k_{CV} \cdot U$, $I_C = k_{CI} \cdot U \cdot l$ } mit $I$ als Strom und $U$ als Spannung in der beeinflussenden Leitung mit l als Länge der beeinflußten Leitung zwischen den Erdern in km

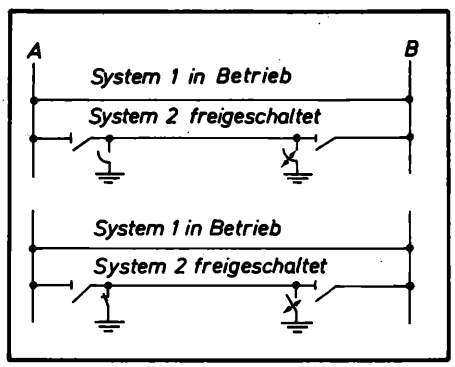



**Bild 5.** Elektrische Belastung beim Öffnen und Schließen von Erdungsschaltern, Prinzip
a) Schalten kapazitiver Ströme beim Schließen und Öffnen des Erdungsschalters in Station B
b) Schalten induktiver Ströme beim Schließen und Öffnen des Erdungsschalters in Station B (bei geschlossenem Erdungsschalter in Station A)

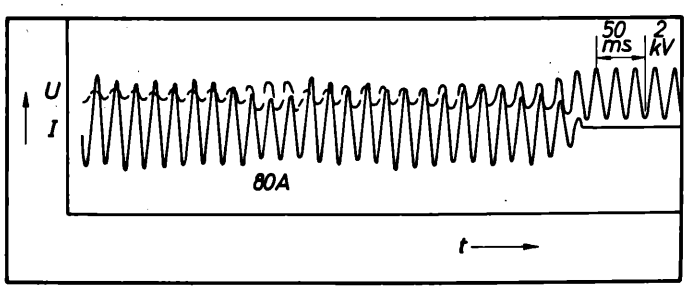



**Bild 6.** Ausschaltungen eines induktiven Stromes von $I_L = 80$ A bei $\Delta U = 2{,}0$ kV

ner beidseitig geerdeten Leitung vertraut sind. Ursache dafür sind kapazitive und induktive Kopplungen zwischen geerdeten und in Betrieb befindlichen Teilen des Elektroenergiesystems, speziell von parallel geführten Freileitungen (Bild 5). Von *Veuhoff* [7] wurden diese Vorgänge im Detail untersucht. Erdungsschalter müssen in der Lage sein, die in der Empfehlung der IEC [3] empfohlenen induktiv und kapazitiv eingekoppelten Ströme (Tabelle 1) zu unterbrechen. Dem Einfluß von Leitungslänge, Leitungsgeometrie und Nennstrom des im Betrieb befindlichen Systems wird durch eine Einteilung in geringe und hohe Einkopplung hinsichtlich der Prüfwerte Rechnung getragen. Das gleichzeitige Auftreten eines Kurzschlußstromes im beeinflussenden System und eines Schaltvorganges mit dem Erdungsschalter im beeinflußten System wird nicht berücksichtig. Es war ein Standpunkt zu den fixierten Parametern für die zu rekonstruierende 220 kV und 380-kV-Schaltanlage zu erarbeiten und für die einzusetzenden Erdungsschalter das Schaltverhalten bei diesen elektrischen Belastungen nachzuweisen [6].

### 2.1. Abschätzung der von einem Erdungsschalter in einer 220-kV- und 380-kV-Schaltanlage zu schaltenden Ströme

Am höchsten belastet wird ein Erdungsschalter beim Öffnen und Schließen, wenn zwischen beeinflussenden und beeinflußtem System ein großer Kopplungsfaktor (z. B. durch fehlende oder unzureichende Verdrillung) und eine Parallelführung über viele Kilometer vorhanden und das beeinflussende System hoch belastet ist. Das betrifft in erster Linie den Erdungstrenner am Leitungsanfang bzw. -ende von langen auf einem Mast parallel geführten Leitungen.
Für eine parallelgeführte 380-kV-Leitung, bei der das beeinflussende System mit 1000 A belastet ist, wurden im Institut für Energetik für das in der ehemaligen DDR übliche Mastbild und die ausgeführte Verdrillung die im beeinflußten System auftretenden Spannungen und Ströme bei einer Parallelführung über 100 km berechnet und dann auf die längste Leitung mit $l = 300$ km extrapoliert. Als Grenzwerte wurden ermittelt [6]:
kapazitive Kopplung 8,85 kV / 11,8 A
elektromagnetische Kopplung 3,65 kV / 42 A
Dies sind Grenzwerte, die im praktischen Netzbetrieb wohl nicht erreicht werden.
Daß selbst bei kurzen, unverdrillten, parallel geführten Leitungen hohe Ströme über den Erdungsschalter fließen können, beweist ein Versuch mit einer beiderseits geerdeten 220-kV-Verbindungsleitung Maschinenhaus-Schaltanlage mit $l = 600$ m, bei der ein Strom von $I_L = 80$ A über den Erdungsschalter gemessen wurde. Dabei auftretende Probleme der Beanspruchung von ortsveränderlichen EuK müssen vom Betreiber unbedingt beachtet werden. Eine Einordnung der Erdungsschalter in die Kategorie A nach Tafel 1 erscheint ausreichend.

### 2.2. Nachweis des Schaltvermögens eines Erdungsschalters

Die Prüfungen an den eingesetzten Erdungsschaltern wurden im Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik" (IPH), Berlin, mit den Belastungen für einen 420-kV-Erdungstrenner nach IEC, Klasse A, durchgeführt. Im Bild 6 ist das Oszillogramm der Ausschaltung eines induktiven Stromes von $I = 80$ A bei einer Spannung von $U = 2$ kV wiedergegeben. Die Werte der unbeeinflußten transienten wiederkehrenden Spannung erfüllten mit $U_P = 4{,}5$ kV und einer Zeit bis zum Erreichen dieses Scheitels von $t = 245$ μs die Forderungen nach [3]. Das Oszillogramm weist deutliche Strom- und Lichtbogenspannungsschwankungen auf. Der Strom wird wegen fehlender Beblasung erst mit Erreichen einer Lichtbogenspannung gelöscht, die der treibenden Spannung entspricht. Bei diesen Versuchen traten Lichtbogenzeiten bis zu $t = 1800$ ms auf.
Im Bild 7 ist der frei brennende Bogen bei einer Ausschaltung des induktiven Stromes von $I = 80$ A zwischen den Kontakten zu sehen.
Mit dem gleichen Kontaktsystem wurden anschließend auch die kapazitiven Ströme geschaltet. Hier waren die Werte mit $I = 1{,}25$ A und $U = 5$ kV vorgegeben. Wegen des kleinen Stromes konnte bei den Schalthandlungen nur ein sehr kleiner Lichtbogen wahrgenommen werden. Die Lichtbogenzeiten waren mit bis zu $t = 650$ ms wesentlich kleiner als im induktiven Schaltfall. Eine Messung des Kontaktwiderstandes nach den Versuchen ergab eine Zunahme von 3 %, die allein in Toleranzen in der Meßwerterfassung begründet sind. Die Kontaktgeometrie des geprüften Gerätes ist so ausgebildet, daß durch den Lichtbogen die für die Kurzschlußstromtragfähigkeit wichtigen Bereiche nicht beansprucht werden. Damit ist eine volle Funktionsfähigkeit des Gerätes auch für den Störfall gegeben.

## 3. Schlußfolgerungen

Mit den durchgeführten Untersuchungen zur elektrischen Belastung der Trenn- und Erdungsschalter beim Öffnen und Schließen

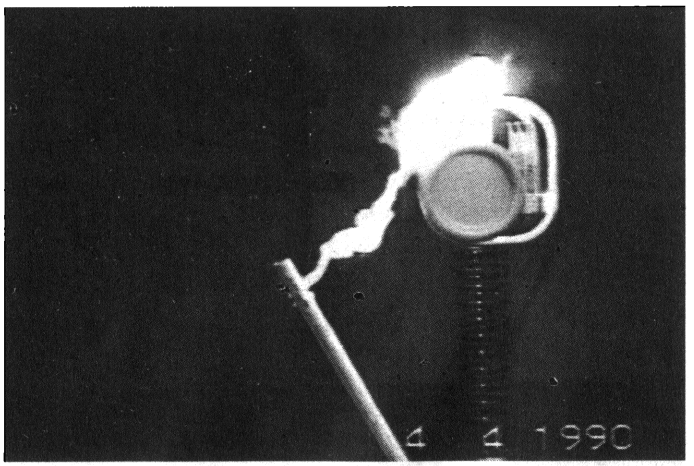


**Bild 7.** Schaltlichtbogen beim Ausschalten eines induktiven Stromes von $I_L = 80\,A$ und $\Delta U = 2{,}0\,kV$ (größte Lichtbogenausdehnung)

sowie der Prüfung des Schaltvermögens wurden Voraussetzungen für eine kritische Bewertung der Prüfvorschriften nach IEC, ein Beitrag zur Auswahl angebotener Geräte und zur auftretenden Störbeeinflussung in einer 220-kV-Schaltanlage geleistet.

**Literatur**


[1] IEC-Standard Publ. 129, Ausgabe 1984: Wechselspannungstrenn- und Erdungsschalter (engl.) identisch mit TGL 14441/15 (Sept. 88)

[2] Revision der IEC Publication 129: Alternating current disconnectors and earthing switches second supplement: „Bus-transfer current switching by disconnectors". IEC 17A (Sekretariat) 293 vom Okt. 1988

[3] Amendment to IEC Publication 129: Alternating current disconnectors and earthing switches Induced current switching by earthing switches; IEC 17A (Sekretariat) 269 vom März 1987; IEC 17A (Sekretariat) 281 vom Aug. 1987; IEC 17A (Sekretariat) 281 vom Okt. 1987

[4] *Bauer, H.; Diessner, A.; Schwirkslies, W.:* EMV-Prüfung mikroelektronischer Baugruppen für den Einsatz in Hochspannungsschaltanlagen im Labor und in der Schaltanlage ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 12, S. 463–469

[5] *Lipken, H.; Neumann, C.:* Der Sammelschienenwechsel als Schaltaufgabe für Trennschalter, Elektrizitätswirtschaft 83 (1984) 20, S. 855–859

[6] *Schwirkslies, W.:* Wissenschaftlich-technische Probleme bei der Rekonstruktion der 220-kV- und 380-kV-Schaltanlagen im KKW Greifswald. Diplomarbeit TU Dresden, Sektion Elektrotechnik Nr. F. 860/1990

[7] *Veuhoff, F. W.:* Ausschaltvermögen von Erdungsschaltern. etz Archiv 9 (1987) 4, S. 109–115


EA 6229


**Auf ein Neues!**

Auch für 1991
wünscht die Redaktion
allen Lesern, Autoren,
Beiratsmitgliedern und
Korrespondenten,
daß es ein Jahr
erfolgreicher Arbeit
und persönlichen Wohlergehens wird.
Wir setzen auch
in Zukunft
auf eine enge
Zusammenarbeit.


# Ultraschalldiagnose an Langstabisolatoren und Geräteporzellanen zur Früherkennung von Porzellanfehlern im Bereich der Armierung


**D. Krause, Dresden**



Während des Betriebes auftretende Selbstbrüche von Langstabisolatoren und Geräteporzellanen führten zur Suche nach einem Verfahren, mit dem gefährdete Isolatoren erkannt werden können. Ein solches Verfahren ist die Ultraschalldiagnose, deren physikalische Grundlagen und Besonderheiten der Anwendung bei der Prüfung von Langstabisolatoren nachfolgend behandelt werden. Die Ausführungen gelten sinngemäß auch für Geräteporzellane, wobei dort aber wegen der veränderten geometrischen Abmessungen die Auswahl der Prüfköpfe und die Bewertung der Prüfung nach diesen geometrischen Bedingungen zu erfolgen hat.


## 1. Ultraschalldiagnose an Langstabisolatoren

### 1.1. Allgemeines

Unter Ultraschall versteht man eine hochfrequente Schwingung, die oberhalb der Hörgrenze liegt. Für Meß- und Prüfzwecke werden je nach Anwendungsfall Frequenzen zwischen 0,5 MHz und 30 MHz, in Ausnahmefällen bis 100 MHz verwendet. Die in der zerstörungsfreien Materialprüfung eingesetzten Geräte arbeiten meist nach dem Impuls-Echo-Verfahren. Dabei wird von einer Schallquelle ein Ultraschallimpuls, der in der Regel die Form einer gedämpften Schwingung hat, in das Prüfstück abgestrahlt. Im Prüfstück breiten sich die Schallwellen mit der entsprechenden Schallgeschwindigkeit geradlinig aus und werden an Grenzflächen zweier unterschiedlicher Medien reflektiert.

Solche Grenzflächen sind: Blasen, Einschlüsse, Risse und vor allem die Außenflächen des Prüflings. Der reflektierte Schall gelangt zum Prüfkopf (Schallquelle) zurück und wird dort wieder in einen elektrischen Impuls umgewandelt, der auf einer Kathodenstrahlröhre als vertikale Auslenkung aufgezeichnet wird.

Zeitproportional erfolgt eine horizontale Auslenkung. Um ein stehendes Bild zu erhalten, werden die Ultraschallimpulse mit einer bestimmten Wiederholungsrate ausgesendet und empfangen. Die ausführliche Beschreibung der Grundfunktionen eines Impulsechogerätes enthält z. B. [1].

Sind der Zeitmaßstab der Abbildung und die Schallgeschwindigkeit bekannt, kann die Entfernung eines Reflektors aus der Schalllaufzeit bestimmt werden:

$$x = \frac{c \cdot t}{2} \qquad (1)$$

x Entfernung des Reflektors bzw. der Wandstärke bis zur Grenzfläche
c Schallgeschwindigkeit im Werkstoff (Prüfling)
t gemessene Hin- und Rücklaufzeit des Schallimpulses

Exakte Entfernungsbestimmungen setzen die Justierung der Meßeinrichtung an einem Eichkörper voraus.


Dr.-Ing. *Dietrich Krause* ist Abteilungsleiter in der Verbundnetz AG i. G., Hauptabteilung Technik, Institut für Energieversorgung Dresden.

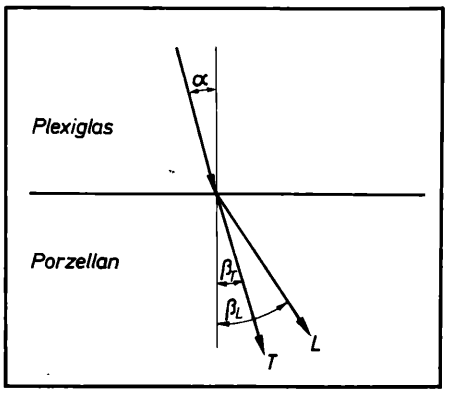



**Bild 1.** Wellenaufspaltung bei der Brechung an einer Grenzfläche
T – Transversalwelle; L – Langitudinalwelle

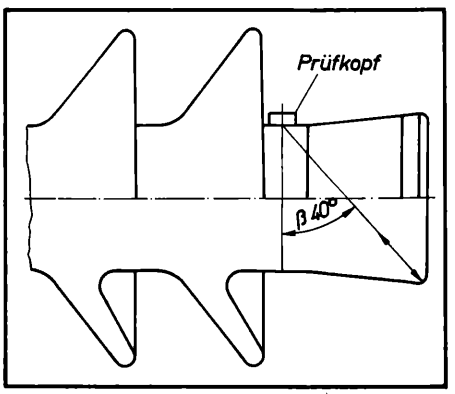



**Bild 2.** Festlegung des Einschallwinkels anhand der Geometrie des Prüflings
$\beta$ – Einschallwinkel

### 1.2. Prüfmöglichkeiten und Auswahl des Prüfverfahrens

Typische Fehler an Porzellanisolatoren sind:
- innere Fehlstellen, z. B. Lunker, Einschlüsse
- Scheibenbrüche unter der Kappe
- poröse Porzellanmasse
- Schrumpfrisse im Kern des Isolators
- durch den Strangpreßvorgang zur Herstellung der Hubel bedingte Materialtrennungen, die von außen nicht sichtbar sind.

Bei großen Hohlisolatoren, z. B. Überwürfen, die nach dem Garnierverfahren hergestellt werden, kann es außerdem abhängig von der Sorgfalt der Ausführung dieser Arbeiten zu einer Materialtrennung in der Garnierebene kommen.

Grundsätzlich ist zu bemerken, daß alle diese Fehler mit Ultraschallprüfverfahren nachgewiesen werden können.

Da gebranntes Porzellan in grober Näherung etwa die gleiche Schallgeschwindigkeit wie Stahl hat und die Schallschwächung auch nicht viel größer als in Stahl ist, läßt sich die Prüfung mit den gleichen Methoden, wie sie bei Stahl gebräuchlich sind, d. h. Fehlerortung nach dem Impuls-Echo-Verfahren bei Frequenzen vorzugsweise zwischen 2 und 5 MHz, durchführen. Geometrische Gründe, z. B. die Abstände zwischen den Schirmen, machen aber teilweise den Einsatz von Spezialprüfköpfen erforderlich. Ultraschallprüfungen beim Hersteller haben den Vorteil, daß am unarmierten Isolator geprüft werden kann und so z. B. eine Längsdurchschallung des Isolators möglich ist. Dem Betreiber steht für Ultraschallprüfungen nur der armierte Isolator zur Verfügung. Um die Einspannenden der Isolatoren, an denen fast alle Brüche auftreten, untersuchen zu können, ist der Einsatz von Winkelprüfköpfen erforderlich. Im folgenden wird deshalb auf diese, beim Betreiber anzuwendende Technik näher eingegangen.

### 1.3. Schrägdurchschallung der Einspannenden eines Langstabisolators mit Ultraschall

#### *1.3.1. Physikalische Grundlagen*

Ultraschall läßt sich nicht nur senkrecht, sondern auch unter einem bestimmten Winkel in das zu prüfende Werkstück einstrahlen. Konstruktiv erreicht man das dadurch, daß man den Wandler auf eine keilförmige Plexiglasvorlaufstrecke klebt. Die vom Wandler (Umwandlung der elektrischen Impulse in Ultraschallimpulse und umgekehrt) ausgestrahlten Ultraschallimpulse durchlaufen die Plexiglasvorlaufstrecke und treffen schräg unter dem Einfallswinkel $\alpha$ auf die Grenzfläche Plexiglas – Porzellan.

An der Grenzfläche zweier unterschiedlicher Medien werden die Ultraschallwellen teils reflektiert, teils unter dem Brechungs- oder Einschallwinkel $\beta$ in das Werkstück eingestrahlt. Hier besteht eine Analogie zur Lichtbrechung, z. B. an der Grenzfläche Luft – Wasser.

Der Einschallwinkel $\beta$ ist vom Verhältnis der Schallgeschwindigkeit in Plexiglas und Porzellan und vom Einfallswinkel $\alpha$ abhängig. Wie bei der Lichtbrechung gilt auch hier das Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\text{Schallgeschwindigkeit Plexiglas}}{\text{Schallgeschwindigkeit Porzellan}} . \qquad (2)$$

Wie beim Übergang des Lichtes von einem Medium in ein anderes gilt für den reflektierten Teil auch hier:

Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel.

Aus dem Brechungsgesetz läßt sich bei bekanntem Einfallswinkel und bekannten Schallgeschwindigkeiten $c_1$ und $c_2$ der Einschallwinkel $\beta$ berechnen:

$$\sin\beta = \frac{c_2}{c_1}\sin\alpha \qquad (3)$$

$$\beta \text{ arc sin } (\frac{c_2}{c_1}\sin\alpha) \qquad (4)$$

Gleichung (4) ist für die Umrechnung des Einschallwinkels bei unterschiedlichen Porzellanmassen (und damit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten) von Bedeutung.

Die Vorgänge bei der Schallreflektion und Brechung an der Grenzfläche zweier Medien laufen aber nicht so einfach ab, wie oben geschildert. Es treten einige Besonderheiten auf, die die Schrägeinstrahlung des Ultraschalls verkomplizieren. Diese Besonderheiten sind:

1. In festen Stoffen treten zwei Wellentypen mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf:
   - Transversalwellen
   - Longitudinalwellen
2. Trifft eine Longitudinalwelle bzw. Transversalwelle nicht senkrecht auf eine Grenzfläche auf, so treten Wellenaufspaltungen sowohl bei der Reflexion als auch bei der Brechung auf (Modenwandel).

Nähere Einzelheiten zu beiden Besonderheiten sind z. B. in [1] enthalten, deshalb wird hier nicht weiter darauf eingegangen, sondern es werden nur die Auswirkungen auf die Prüftechnik behandelt. An der Grenzfläche Plexiglas – Porzellan reflektierte Schallwellen spielen bei Winkelprüfköpfen keine Rolle. Die Prüfköpfe sind mit einem Dämpfungskörper ausgerüstet, der diese Wellen absorbiert.

Im Porzellan selbst treten aber zwei mit unterschiedlichen Brechungswinkeln weiterlaufende Wellen – eine Longitudinal- und eine Transversalwelle – auf. Die Transversalwelle hat eine geringere Schallgeschwindigkeit als die Longitudinalwelle. Demzufolge läuft sie auch mit einem kleineren Einschallwinkel $\beta$ in das Porzellan ein. Die Wellenaufspaltung führt dazu, daß bei der Suche nach Reflektoren (z. B. Rissen), die immer mit einem Bewegen des Prüfkopfes über den Isolator verbunden ist, der Reflektor einmal von der Longitudinalwelle und zum anderen auch von der Transversalwelle erfaßt werden kann. Entsprechend den unterschiedlichen Laufzeiten entstehen zwei Echobilder an unterschiedlichen Stellen des Leuchtschirmes. Dieser Befund ist nur schwer zu interpretieren. Es besteht die Gefahr, daß die zwei unterschiedlich positionierten Echos als zwei Reflektoren gedeutet werden (z. B. Rückwand- und Fehlerecho) und der Isolator dadurch als „fehlerbehaftet" aussortiert wird.

Dieser unbefriedigende Zustand kann durch entsprechende Wahl des Einfallswinkels $\alpha$ beseitigt werden. Der Einfallswinkel wird so festgelegt, daß sich nur noch eine Wellenart im Porzellan ausbreiten kann, d. h. eine Wellenart wird ausgeblendet. Aus dem Brechungsgesetz (2) läßt sich bei bekannten Schallgeschwindigkeiten im Plexiglas und Porzellan der Bereich für den Einfallswinkel berechnen, in dem keine Longitudinalwelle im Porzellan auftritt. Der erforderliche Einschallwinkel $\beta$, der sich aus der Geometrie des Prüflings ergibt, ist bei der Fertigung des Prüfkopfes in diesen Bereich zu legen. Diese kurzen Darlegungen zeigen, daß bei der

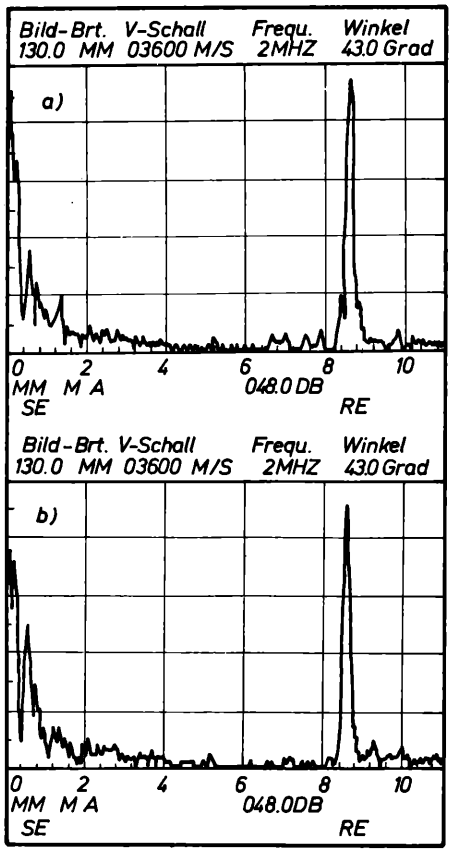



**Bild 3.** Justierbild und Echobild eines „gesunden Isolators"
a) Justierbild; Rückwandecho auf ca. 100 % Bildschirmhöhe eingestellt
b) Echobild

Prüfung von Langstabisolatoren mit Winkelprüfköpfen die Transversalwellengeschwindigkeit des Porzellans bekannt sein muß, um die Parameter für einen geeigneten Prüfkopf festlegen zu können. Nachfolgend deshalb einige Bemerkungen zur Schallgeschwindigkeit im Porzellan.

*1.3.2. Schallgeschwindigkeit im Porzellan*

Porzellan ist ein Werkstoff, der in der Natur nicht vorkommt. Er entsteht aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen in einem bestimmten technologischen Prozeß. Folglich sind die Eigenschaften von Porzellan sowohl von den Ausgangsstoffen als auch von der Qualität des Herstellungsprozesses abhängig. Das trifft auch voll auf die Schallgeschwindigkeit zu. Zu beachten ist, daß es beim Porzellan entsprechend den Ausführungen unter Punkt 1.3.1. zwei Wellenarten und damit auch zwei Schallgeschwindigkeiten gibt:

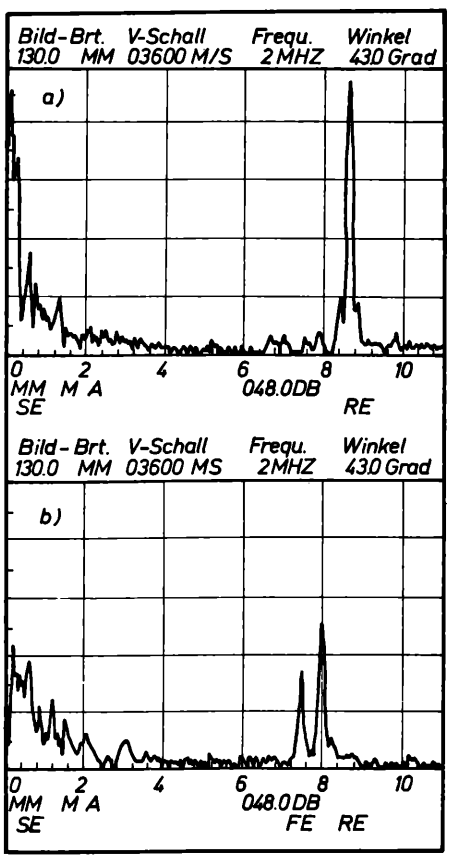



**Bild 4.** Justierbild und Echobild eines fehlerhaften Isolators
a) Justierbild; Rückwandecho auf ca. 100 % Bildschirmhöhe eingestellt
b) Echobild; Fehlerecho vor dem Rückwandecho

Transversalwellengeschwindigkeit $c_{trans}$, $c_T$
Longitudinalwellengeschwindigkeit $c_{long}$, $c_L$.

Für die Schräg- oder Winkeldurchschallung ist nur die Transversalwellengeschwindigkeit, die niedriger als die Longitudinalwellengeschwindigkeit ist, von Bedeutung. Neben Materialschwankungen (Rohstoffschwankungen, Mischung) reagiert die Schallgeschwindigkeit auch auf verhältnismäßig geringe Abweichungen und Unterschiede im Sinterungszustand, d. h., für die Schallgeschwindigkeit von Porzellan kann man keinen allgemeingültigen Wert angeben. Zur Orientierung sollen hier Werte für die Transversalwellengeschwindigkeit (je nach Ausgangsrohstoffen) zwischen 3400 und 3900 m/s genannt werden.
Nähere Ausführungen zur Schallgeschwindigkeit im Porzellan sind u. a. in [2], [3], [4] enthalten.

### 1.4. Durchführung der Prüfung im Betrieb

*1.4.1. Voraussetzungen zur Durchführung von Ultraschallprüfungen*

Zur Durchführung der Prüfungen sind ein Prüfgerät und geeignete Prüfköpfe erforderlich. Das Prüfgerät muß über einen Leuchtschirm verfügen, auf dem die Echos sichtbar gemacht werden können. Die Handhabung der Geräte geht aus der jeweiligen Bedienungsanleitung hervor und bereitet nach kurzer Einarbeitungszeit keine Probleme.
Die notwendigen Prüfköpfe sind anhand einer Zeichnung des zu prüfenden Langstabisolators (am besten im Maßstab 1:1) auszuwählen.
Im Bild 2 ist das Vorgehen schematisch dargestellt. Der Prüfkopf wird zwischen Armierung und erstem bzw. letztem Schirm aufgesetzt. Es ist ein solcher Winkel auszuwählen, bei dem der Zentralstrahl des Schallbündels voll in die Ecke des Strunks trifft. Der Strahl wird dann in sich reflektiert und man erhält die maximale Amplitude des Rückwandechos (RE). Die Auswahl des Prüfkopfes ist für das obere und untere Ende des Isolators durchzuführen. Unterschiede sind möglich, da am unteren Ende eine größere Strecke für die axiale Verschiebung des Prüfkopfes (Bereich unter dem Schirm kann genutzt werden) zur Verfügung steht.
Die Eigenschaft des Ultraschalls, sich nicht in Luft auszubreiten, führt dazu, daß er einmal in das Prüfstück eingestrahlt, nicht an Grenzflächen Prüfstück – Luft wieder austreten kann. So erhält man ein einwandfreies Rückwandecho, da der Ultraschallimpuls an der Grenzfläche Außenwand – Luft reflektiert wird. Andererseits bereitet es aber auch Schwierigkeiten, den Ultraschall überhaupt in den Prüfling zu bekommen. Beim Aufsetzen des Prüfkopfes auf das Prüfstück ist der winzige Luftspalt zwischen Prüfkopf und Prüfstück ausreichend, um den Eintritt des Ultraschalls in das Prüfstück zu verhindern. Auch eine Erhöhung des Anpreßdruckes führt nicht zum Ziel. Für das Einleiten des Ultraschalls in das Prüfstück ist deshalb noch ein Koppelmittel erforderlich, das den Luftspalt zwischen Prüfkopf und Prüfstück ausfüllt. Dieses Koppelmittel kann fester oder flüssiger Natur sein. Es eignen sich dazu z. B. Fette, Bienenwachs, Öl, Glyzerin, Wasser u. ä. Auch spezielle Koppelpasten werden angeboten. Entscheidend für die Auswahl des Koppelmittels ist, daß bei den gegebenen Prüfbedingungen immer genügend Koppelmittel zur Verfügung steht.
Für ein ausbleibendes oder ein Rückwandecho mit sehr kleiner Amplitude ist sehr oft fehlendes Koppelmittel die Ursache. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß neben den gerätemäßigen Voraussetzungen (Prüfgerät, Prüfköpfe), dem geeigneten Koppelmittel und der Qualifikation des Prüfers für Ultraschallprüfungen auch die Prüfbarkeit des Werkstückes (Isolator) entsprechend seinen geometrischen Abmessungen gegeben sein muß.

*1.4.2. Durchführung und Bewertung der Prüfung*

Ideal für den Betreiber wäre es, wenn die Prüfungen ohne Beeinträchtigung des Betriebes, d. h. im eingebauten Zustand und unter Spannung, erfolgen könnten. Aus unterschiedlichen Gründen ist das aber nicht möglich. Hierzu zählen u. a.:

- Lichtbogenschutzarmaturen, die das ordnungsgemäße Aufsetzen und Führen des Prüfkopfes behindern
- elektrisch leitende Verbindung zwischen Prüfkopf und Gerät.

In Umspannwerken eingebaute Langstabisolatoren können bei Inkaufnahme gewisser Schwierigkeiten und auch einiger Unsicherheiten bei der Bewertung der Echobilder im spannungslosen Zustand geprüft werden. Die besten Prüfbedingungen hat man jedoch an ausgebauten Isolatoren, die zur Prüfung waagerecht und drehbar gelagert sind. Bei unklarem Echobild können in diesem Falle leicht Nachmessungen mit anderen Prüfköpfen und an unterschiedlichen Aufsatzstellen, z. B. zwischen den Schirmen (letzter und vorletzter Schirm) vorgenommen werden. Die Durchführung und Bewertung der Prüfungen erfolgt nach einer Prüfanweisung, die alle damit im Zusammenhang stehenden Fragen regelt.

Normalerweise bereitet die Auswertung des Echobildes keine großen Schwierigkeiten. Bei einem fehlerfreien Isolator hat das Kantenecho konstante Laufzeit und etwa konstante Amplitude, d. h., bei der Drehung des Isolators erscheint das Echo immer an der gleichen Stelle des Leuchtschirmes und in etwa auch mit der gleichen Amplitude. Bei einem Isolator mit Scheibenriß ergibt sich je nach Ausbildung des Risses bei der Drehung des Isolators eine Anzeige mit wechselnder Amplitude und Laufzeit. Das Echo erscheint an unterschiedlichen Stellen des Leuchtschirmes und mit unterschiedlicher Amplitude, d. h., es tritt eine Anzeige auf, die sich deutlich von der eines gesunden Isolators unterscheidet.

Es gibt aber einige Besonderheiten, die bei der Bewertung der Echobilder zu beachten sind und deshalb in der Prüfvorschrift behandelt werden müssen [5].

Hierzu zählen z. B. Entstehung von Oberflächenwellen durch unvollständigen Kontakt des Prüfkopfes mit dem Prüfstück, Auftreten von Scheinanzeigen durch die Öffnung des Schallbündels, aber auch Unregelmäßigkeiten, die durch die Geometrie des Prüflings bei nicht zeichnungsgerechter Fertigung entstehen. Bei Prüfung großer Stückzahlen kann der letztere Fehler erkannt werden, da dieses scheinbare Fehlerecho immer an der gleichen Stelle auftritt.

Diese Ausführungen zur Interpretation der Echobilder unterstreichen die Notwendigkeit der Prüfungen durch den gleichen Personenkreis, um ausreichende Prüferfahrungen zu sammeln. Gleichzeitig unterstreichen sie die Wichtigkeit einer stichprobenweisen Nachprüfung der ausgesonderten Isolatoren durch Entfernen der Kappe und Sichtkontrolle des Einspannendes.

**Literatur**


[1] *Krautkrämer, J.* und *H.*: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Springer-Verlag 1986

[2] *Weismantel, H.*: Zerstörungsfreie Prüfung von Hochspannungsisolatoren mit Ultraschall. Scientia Electrica 5 (1959) 3, S. 113–120

[3] *Stüber, C.*: Zerstörungsfreie Untersuchung von Hochspannungsisolatoren mit Hilfe des Ultraschall-Impulsverfahrens. Proc. 3. Internat. Congs. Acout, Amsterdam, Elsevier Publish. Comp. 1960

[4] *Böhme, W.*: Schallgeschwindigkeitsmessungen an Langstabisolierkörper zur Porositätsuntersuchung mit einem direktanzeigendem Zusatzgerät. Herms. Techn. Mitt. (1965) 12, S. 351–361

[5] Ultraschallprüfvorschrift Nr. 01/89, Verbundnetz AG EA 6231


# Schaltgeräteorientierte und pfadorientierte Schaltfehlerschutzsysteme für Hochspannungs-Schaltanlagen


**H. Bauer; St. Berthold; Dresden**



Der Schaltfehlerschutz ist eine wichtige Funktion für den Betrieb von Schaltanlagen. Seine Aufgabe ist es, Schalthandlungen hinsichtlich ihrer elektrischen Zulässigkeit zu kontrollieren und gegebenenfalls zu unterbinden. Ausgehend von einem Vergleich realisierter Schaltfehlerschutzapplikationen [1] werden die Anforderungen analysiert und Vorteile eines pfadorientierten Schaltfehlerschutz-Algorithmus begründet. Dabei bleiben Fragen des Aufbaus und der Inbetriebnahme spezieller Anwendungen ausgespart [2].


## 1. Allgemeine Anforderungen an einen Schaltfehlerschutz

Da der Schaltfehlerschutz in die Kategorie der Schutzsysteme einzuordnen ist, unterliegt er strengeren Bestimmungen als andere Bestandteile einer Schaltanlage. Als Basiskriterien für seine Bewertung sind die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit zu betrachten.

Es ist sicherzustellen, daß das Schaltfehlerschutzsystem nur jene Anweisungen zuläßt, die vom Anwender vorgeschrieben werden. Keinesfalls sind Nebeneffekte gestattet, die undefinierte Reaktionen und demzufolge auch gefährdende Zustände nach sich ziehen können. Das schließt die durch äußere Einflüsse hervorgerufenen Instabilitäten ein. Als Maßnahmen dafür bieten sich der Einsatz von Redundanz, die Kombination diversitärer Schaltungen sowie periodische Funktionstests an. Die in den heute realisierten Geräten verfügbare Intelligenz stellt dafür die notwendige kostengünstige Leistung bereit.

An die Verfügbarkeit eines Schaltfehlerschutzes sind ähnlich hohe Ansprüche zu richten, um hemmende Einflüsse zu vermeiden. So ist es nicht tragbar, den Ausfall einer Komponente erst bei Inanspruchnahme der Funktion festzustellen. Der Status muß ständig überprüft und die Einsatzbereitschaft gemeldet werden. Außerdem sollte der Defekt einer Leittechnikkomponente nicht zu einem Funktionsverlust des Schaltfehlerschutzes führen. Um den Aufwand für einen autarken Schaltfehlerschutz zu mindern, sind alternative Betriebsvarianten vorzusehen, die z. B. im Fehlerfall bei geringerem Komfort die gleiche Zielfunktion realisieren.

Eine nicht zu unterschätzende Eigenschaft eines Produktes stellt dessen Wirtschaftlichkeit dar. Ein moderner Schaltfehlerschutz sollte eine geringe Ansteuer- und Meldeleistung aufweisen, sich kurzfristig, freizügig und sicher für neue Konfigurationen parametrieren lassen, eine Ersatzteillagerung mit niedrigen Kosten gewährleisten sowie ausreichend schnell, einfach und handlungssicher zu bedienen sein. Dem letzten Aspekt wird besondere Aufmerksamkeit gewidmet, da eine übersichtliche und verständliche Bedienoberfläche auch die Akzeptanz durch das Betriebspersonal verbessert.


Dr.-Ing. *Hartmut Bauer* ist ordentlicher Hochschuldozent, und Dipl.-Ing. *Steffen Berthold* ist Forschungsstudent am Institut für Elektroenergieversorgung der Technischen Universität Dresden.

## 2. Entwicklungsstand des Schaltfehlerschutzes

### 2.1. Struktur

Es lassen sich zwei Entwicklungslinien ableiten:

1. Schaltfehlerschutzsysteme, die mit der konventionellen Sekundärtechnik zusammenarbeiten können und darauf aufbauend den schrittweisen Ausbau zu mikrorechnergestützter Leittechnik ermöglichen
2. Hochintegrierte Leittechnikkonzepte, die meist einen Neuaufbau oder eine umfassende Umrüstung der Schaltanlage bedingen.

Gegenwärtig sind im wesentlichen drei Schaltfehlerschutzkonfigurationen im Einsatz:

a) Konventioneller Schaltfehlerschutz (Bild 1)
b) Schaltfehlerschutz als autarkes System (Bild 2)
c) Schaltfehlerschutz als separate Teilfunktion der Leittechnik (Bild 3).

Die erste Form der Realisierung hat aufgrund der Betriebskosten, den wenigen gebotenen Serviceleistungen und durch den einer Einzellösung entsprechenden Wartungs- und Reparaturaufwand seinen Ablösezeitpunkt erreicht. Der Entwicklungsstand des Schaltfehlerschutzes ist durch mikrorechner- und softwarebasierte Systeme gekennzeichnet, die einen Großteil der gestellten Anforderungen erfüllen.

Dem autarken Schaltfehlerschutz (Bild 2) steht gegenwärtig das weiteste Einsatzgebiet offen, da die Realisierung sowohl in Verbindung mit herkömmlicher Technik als auch modernster Leitsysteme möglich ist. Grundlage dafür ist seine völlige Eigenständigkeit, wobei er über eine Anzahl einfacher und standardisierter Schnittstellen mit anderen Komponenten kommunizieren kann. Der Vorteil der Unabhängigkeit von einem Leitsystem wird mittels erhöhten Hardwareaufwandes zur Verwirklichung des anlagenbezogenen Schaltfehlerschutzes und Wegfalls einiger durch die Leittechnik gebotenen Zusatzleistungen erreicht. Ein Zentralgerät, das entweder nur die anlagenüberwachende Funktion ausübt oder zusätzlich die Steuerung eines Schaltfeldes (z. B. Kupplung) übernimmt, koordiniert die Zusammenhänge der einzelnen Schaltfehlerschutzgeräte in den Abgängen. Die Fernwirkankopplung wird entweder über das Zentralgerät oder eine einfache elektromechanische Schnittstelle in jedem Abgangsgerät verwirklicht. Durch konstruktive Trennung der Elektronik vom Steuerkreis ermöglicht man bei einem Defekt der elektronischen Steuerung mittels einer einfachen Umschaltung auf unmittelbare (Vor-Ort-, Fern-, Nah-) Steuerung die Fortsetzung der Arbeit. Dadurch ist eine hohe Verfügbarkeit der Schaltgerätesteuerung gewährleistet. Um die komfortable grafische Bedienoberfläche der Leitsysteme nicht völlig entbehren zu müssen, findet man auf der Frontseite der Geräte den verwalteten Schaltanlagenausschnitt als Schaltbild in Mosaiktechnik dargestellt. Neben den Symbolen der Schaltgeräte sind Bedienelemente eingelassen, so daß eine eindeutige Zuordnung garantiert ist. Weiterhin werden die Endstellungen, in mehreren Anwendungsfällen auch die Mittelstellung der Schaltgeräte sowie der Meldespannungsausfall angezeigt. Mit dem autarken Schaltfehlerschutz lassen sich besonders Projekte verwirklichen, in denen der schrittweise Ausbau einer Schaltanlage von einer Minimallösung ausgeht. Außerdem gestaltet sich die Nachrüstung eines autarken Schaltfehlerschutzes in herkömmlichen Anlagen komplikationslos, wenn die Schaltgeräte elektrisch gesteuert werden.

Durch hardwaremäßige Aufteilung des Schaltfehlerschutzes in anlagen- und abgangsbezogene Komponenten wird die Dezentralisierung der Leittechnik unterstützt (Bild 3). Während der anlagenbezogene Schaltfehlerschutz in der zentralen Leittechnik verbleibt, wird der abgangsbezogene Anteil in das Schaltfeld delegiert. Erkennbar ist, daß dadurch eine teilweise Redundanz geschaffen wird. Der hohe Softwareanteil gestattet eine große Flexibilität und die Möglichkeit einfacher Tests. Die enge Verknüpfung mit der Leittechnik unterstützt die Nutzung der damit zusätzlich zur Verfügung stehenden Leistungen. Es lassen sich Betriebsmittelgrenzwerte, der aktuelle Lastfluß und evtl. auch eine Stabilitätsanalyse in die Entscheidungsfindung einbeziehen.

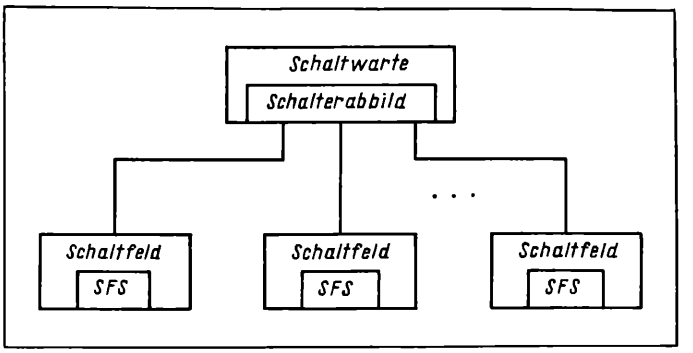



**Bild 1.** Konventioneller Schaltfehlerschutz

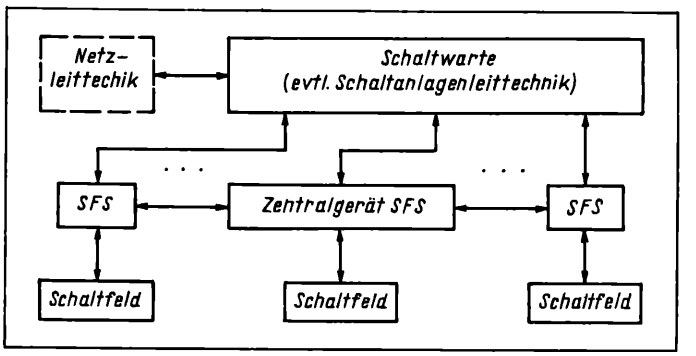



**Bild 2.** Schaltfehlerschutz als autarkes System

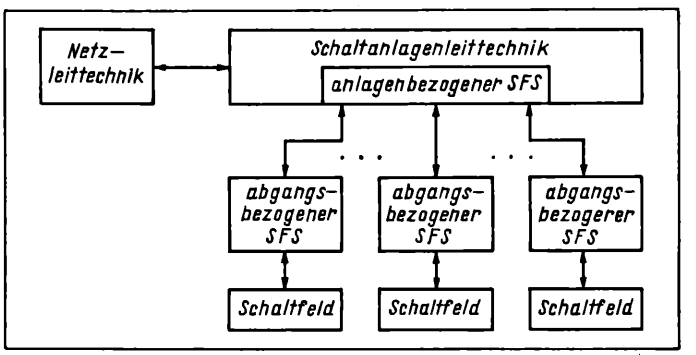



**Bild 3.** Schaltfehlerschutz als separate Teilfunktion der Schaltanlagenleittechnik

Die Vor-Ort-Installation des Schaltfehlerschutzes erlaubt eine direkte Kopplung an die Primärtechnik. Aufgrund der Prozeßnähe erhöht sich die Reaktionsgeschwindigkeit für kritische Fälle, z. B. bei Schalterfall während Schalthandlungen, da die Leittechnik entlastet und Laufzeiten von Daten verringert werden. Schwierigkeiten sind bei einem schrittweisen Umrüsten älterer Anlagen zu erwarten. Der Einsatzbereich der beschriebenen Konfigurationen wird vordergründig in mittleren und größeren Schaltanlagen normalen Funktionsumfanges gesehen.

### 2.2. Grundprinzipien

In den Geräten dominiert die Strategie, nur nach dem Ausschließlichkeitsprinzip erkannte Zustände zu verarbeiten. Grundlage dieses Prinzipes bildet die konjunktive Verknüpfung mehrerer die Zielaussage beeinflussender Bedingungen. Beispiele:

- Zwei-Hand-Betrieb bei Vor-Ort-Bedienung
- zweipolige (antivalente) Meldungserfassung
- Überwachung der Schalterlaufzeit sowie der Melde- und Steuerkreise auf Durchlaß und Kontaktgabe zwecks Meldungsbeurteilung.

Schaltfehlerschutzsysteme nehmen umfangreiche Selbsttests vor. Neben speziellen Kontrollprogrammen wird dafür installierte Redundanz genutzt. Komfortable Systeme betreiben redundante Teile optional parallel und überprüfen deren Ergebnisse auf Übereinstimmung. Diese Betriebsweise bringt zusätzliche Sicherheit

**Tafel 1.** Hauptvarianten für die Abarbeitung des Schaltfehlerschutzes

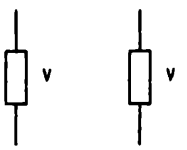
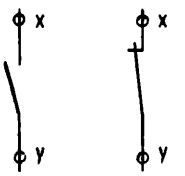
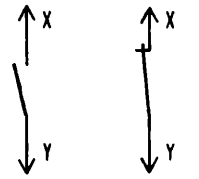
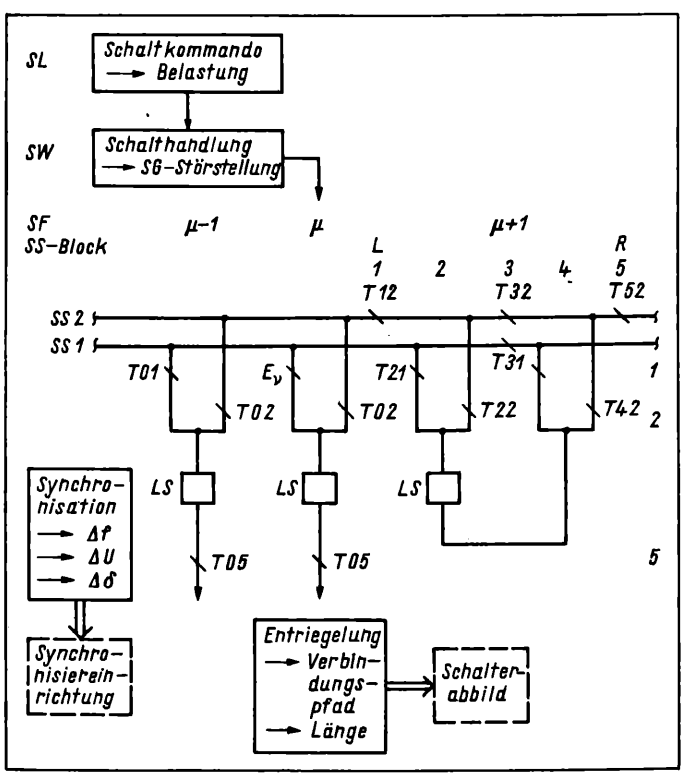
| Orientierung | | schaltgeräteorientiert | pfadorientiert | |
|---|---|---|---|---|
| Inhalt | | Bedingungsprüfung | Punktvergleich | Baumanalyse |
| Bedingungen | |  |  |  |
| Vororientierung auf | Blockierung | $E_v = B\{ z_j, \bar{z}_k \}$ $A_v = B\{ z_j, \bar{z}_k \}$ | Punkte/Pfade: - geerdet<br>- getrennt ( Länge )<br>- belastet ( ± Leistung, Verbindungspfad, Spannung) | |
| | Freigabe | $\bar{E}_v = B\{ z_j, \bar{z}_k \}$ $\bar{A}_v = B\{ z_j, \bar{z}_k \}$ | | |
| Beschreibung | | Überprüfung der Einschaltbedingungen bzw. Verriegelungsbedingungen vor jeder Ein- und Ausschaltung ( Boole'sche Gleichungen ) | Bestimmung der Eigenschaften aller Knotenpunkte nach jeder Schaltzustandsänderung und Vergleich beider Knotenpunkteigenschaften vor jeder Schalthandlung | Bestimmung und Vergleich der Eigenschaften beider Pfade vor jeder Schalthandlung |
| Vorteile | | kurze Reaktionszeit | sehr kurze Reaktionszeit<br>geringer Speicherbedarf<br>Zustandsspeicher für Zustandsabbild nutzbar ( Kontrolle ! ) | geringster Speicherbedarf |
| | | | geringer Aufwand für Ergänzung, Änderung und Kontrolle<br>Erweiterung durch Belastungs-, Kommutierungs- und Synchronkontrolle | |
| Nachteile | | großer Speicherbedarf<br>großer Änderungs-/Ergänzungsaufwand<br>großer Kontrollaufwand | große Rechenzeit nach jeder Schaltzustandsänderung | |

**Bild 4.** Zur Realisierung eines Schaltkommandos bei konventionellem Schaltfehlerschutz

Ev$\mu$ Schließen des Trennschalters $v$ im Schaltfeld $\mu$ (Schaltkommando)
LS Leistungsschalter
SF Schaltfeld
SL Schaltleitung → an dieser Stelle zu bewerten
SSi Sammelschiene i ⇒ Ablösung der manuellen Bedienungsvariante
SG Schaltgerät
SW Schaltwarte
T.. Trennschalter




entsprechend obigen Prinzips. Eine weitere Verbesserung ergibt sich bei Einsatz diversitär funktionierender Baugruppen, weil dann äußere Einflüsse seltener bei beiden Komponenten zu Fehlreaktionen führen.

Ein anderer Aspekt des Redundanzeinsatzes ist die Erhaltung der Arbeitsfähigkeit des Systems bei Teilausfällen, was mittels Neukonfigurierung des Schaltfehlerschutzgerätes gelöst wird. Unter teilweiser Einbuße des Ausschließlichkeitsprinzips kann das System anschließend weiterbetrieben werden.

Bemerkenswert sind Applikationen, bei denen die Strategie des Redundanzeinsatzes dynamisch zwischen Sicherheits-, Zuverlässigkeits- und Leistungssteigerung wählbar ist.

Allerdings ist nicht in allen Konzepten Redundanz vorgesehen. Da dem Betreiber die Entscheidung obliegt, ob sein Anwendungsfall die zusätzlichen Kosten rechtfertigt, werden hoch beanspruchte oder weniger zuverlässige Komponenten optional redundant angeboten.

Ein Überblick über angebotene Schaltfehlerschutzgeräte bestätigt, daß die 8-Bit-Technik ausreichend leistungsfähig ist, um neben den anstehenden Grundaufgaben auch zusätzlichen Service zu bieten. Mehrheitlich sind 8-Bit-Standardprozessoren und Mikrocontroller im Einsatz, bei komplexen Zielstellungen weitet sich der Aufwand über den Betrieb von 16-Bit-Prozessoren über 32-Bit-Prozessoren bis zu Mehrprozessorsystemen aus. Die dominierenden seriellen Verbindungen unterliegen je nach gestellten Leistungskriterien unterschiedlichen internationalen Standards. Meist existiert aber eine Angebotsliste wahlweise einsetzbarer Schnittstellen und Übertragungsprotokolle, die unterschiedlichsten Einsatzbedingungen gerecht werden.

### 2.3. Algorithmen

Die verbindungsdrahtprogrammierte konventionelle Lösung mit Hilfe eines relaisgestützten Schalterabbildes ist auf das zu betätigende Schaltgerät orientiert. Eine Schalthandlung wird unmittel-

**Tafel 2.** Verriegelungsbedingungen für das Schließen des Trennschalters $v$ im Schaltfeld $\mu$ entsprechend Bild 4
Voraussetzung: Unmittelbare Verriegelung zwischen Trennschalter und zugeordneten Erdungsschaltern (z. B. wenn T12, dann $\overline{E12L}$ und $\overline{E12R}$)
Bezeichnung: SG = SG ein (E) bzw. geschlossen
$\overline{SG}$ = SG aus (A) bzw. geöffnet
Kategorien: a üblicher Schalterfehlerschutz (schaltfeldbezogen)
b, c schaltfeldübergreifender Schaltfehlerschutz (bei SS-Wechsel)
erfordert Aufhebung der Verriegelung vor Ort oder Lösung mittels Schalterabbild
d, e unbelastetes Zuschalten eines Sammelschienenabschnittes
erfordert Aufhebung der Verriegelung vor Ort oder Lösung mittels Schalterabbild
– hohe Zuverlässigkeits- und Handlungssicherheitsanforderungen (SG-Stellung, keine Isolationsfehler, ...)
– Oft nicht zugelassen, da meistens unproblematisch mittels LS (im betreffenden Schaltfeld $\mu$ bei e bzw. in der Kupplung $\mu+1$ bei d) realisierbar.

| Schaltfeld | $\mu$ | $\mu$-x | $\mu$+1 | Kategorie |
|---|---|---|---|---|
| $E_{v\mu}$ | $\overline{LS}$ $\overline{T02}$ $\overline{E02LS}$<br>$\overline{T05}$ $\overline{T02}$ $\overline{E02LS}$ $\overline{E05LS}$ | | | a |
| | $\overline{LS}$ T02<br>$\overline{T05}$ T02 | (für ein x)<br>T01 T02<br>T01 T02 | | b |
| | $\overline{LS}$ T02<br>$\overline{T05}$ T02<br>$\overline{LS}$ T02<br>$\overline{T05}$ T02 | | T12 T22 LS T41 T31<br>T12 T22 LS T41 T31<br>T12 T32 T42 LS T21<br>T12 T32 T42 LS T21 | c |
| | ( $\overline{LS}$ T02 )<br>( $\overline{T05}$ T02 ) | (für alle x)<br>$\overline{T01}$ $\overline{E01SS}$<br>$\overline{T01}$ $\overline{E01SS}$ | $\overline{T31}$ $\overline{E31L}$<br>$\overline{T31}$ $\overline{E31L}$ | d |
| | ( $\overline{T02}$ LS T05 ) | (für alle x)<br>$\overline{T01}$ $\overline{E01SS}$ | $\overline{T31}$ $\overline{E31L}$ | e |

bar vor jeder Ein- oder Ausschaltung nach Überprüfung des Schaltzustandes bestimmter Schaltgeräte freigegeben (Vororientierung auf Blockierung). Die Bedingungen lassen sich getrennt nach Einschalten E und Ausschalten A für das Schaltgerät $v$ als Boole'sche Gleichungen $B(...)$ schreiben, wobei die Zustände ($\bar{Z}$, Z) der Schaltgeräte ($j$ bzw. $k$) als Boole'sche Variable betrachtet werden (Tafel 1). Diese schaltgeräteorientierte Lösung ist einfach auf mikrorechnergestützte Systeme übertragbar, indem das Programm die in Tabellenform generierbaren Parameter entsprechend der Boole'schen Gleichung verwendet und auf das im Arbeitsspeicher enthaltene Zustandsabbild der Schaltanlage zugreift. Der Aufwand für die ingenieurmäßige Aufbereitung, die Generierung und die Prüfung ist sehr hoch, demzufolge hierfür CAD-Programme entwickelt wurden.
Beispielsweise wird das Schließen (E) des Trenners $v$(T01) im Schaltfeld $\mu$ (Bild 4) durch einen schaltfeldbezogenen Schaltfehlerschutz freigegeben, wenn eine der ersten beiden Bedingungen (a) in Tafel 2 erfüllt ist. Bereits für einen Sammelschienenwechsel sind die Verriegelungsbedingungen aufzuheben. Da grundsätzlich beim Außerkraftsetzen des Schaltfehlerschutzes die größte Wahrscheinlichkeit und auch die größte beobachtbare Häufigkeit für Fehlhandlungen auftritt, war die Erweiterung zum schaltfeldübergreifenden Schaltfehlerschutz (b und c in der Tafel 2) erstrebenswert. Das hierzu erforderliche Schalterabbild ist in konventioneller Technik außerordentlich materialintensiv. Darüber hinausgehende Möglichkeiten (d und e in der Tafel 2) wurden trotz ihrer elektrischen Zulässigkeit aufgrund des hohen Aufwandes und der hohen Zuverlässigkeitsanforderung beim schaltgeräteorientierten Schaltfehlerschutz durch Betriebsvorschriften unterbunden. Andere Funktionsinhalte, wie beispielsweise die Synchronisation, sind gegenwärtig autark ausgeführt. Die Belastungskontrolle entlang des Versorgungspfades oblag der manuellen Überprüfung bei der Erteilung des Schaltkommandos. Die systematische Zusammenstellung der Bedingungen für einen pfadorientierten Schaltfehlerschutz-Algorithmus (Tafel 3) zeigt, daß bemerkenswerte Erweiterungen bis in die Bereiche der Synchronisation und des Überlastschutzes möglich sind.

## 3. Trendeinschätzung zum Schaltfehlerschutz

### 3.1. Generierung der Software

Es gilt das Ziel zu verfolgen, den Menschen als häufigste Fehlerursache von der umfangreichen Routinearbeit in der Phase der Einsatzvorbereitung zu entlasten. Auf der Basis von Algorithmen können in CAD-Programmen mittels grafischer Beschreibung der Schaltanlagentopologie und speziell zu beachtender Verriegelungsbedingungen Schaltfehlerschutzprogramme generiert und getestet werden. Damit verbessert sich auch die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine wesentlich und Fehlereinflüsse sind bei korrekt arbeitendem Algorithmus auszuschließen.

### 3.2. Parametrierung

Bisher dominierten zwei Verfahren zur Anpassung eines schaltgeräteorientierten Schaltfehlerschutzes (Tafel 1) an Veränderungen in der Schaltanlage oder der Betriebsweise. Entweder wurde das System bereits für den geplanten Endausbau der Anlage programmiert und noch nicht existente Teile werden simuliert oder die Veränderung zog eine aufwendige Neuprogrammierung nach sich. Die pfadorientierten Schaltfehlerschutzalgorithmen (Tafel 3) ermöglichen einen effektiveren Weg. Da das Grundprogramm nach Festlegung der Schaltbedingungen nur bei geänderter Betriebsweise variiert werden muß, kann der Algorithmus fest programmiert werden. Bei Topologieänderungen der Schaltanlage ist lediglich die neue Anlagenkonfiguration einzuspeichern demzufolge diese Information in leichter modifizierbaren Speicherbausteinen (EEPROM) zu verwalten sind. Die Bedienoberfläche der Vor-Ort-Geräte kann unter Verwendung der Mosaiktechnik angepaßt werden. Sie ermöglicht beliebige Darstellungen, ist robust ausgeführt und durch standardisiertes Raster gut mit Bedien- und Anzeigeelementen kombinierbar.

### 3.3. Prozeßschnittstellen

Durch die weitere Entwicklung der Primärtechnik zeichnet sich als Trend eine Vereinfachung im Aufbau des Schaltfehlerschutzes ab. Die Herstellerindustrie wird ihre Schaltgeräte künftig mit Steuer- und Meldeschnittstellen ausrüsten, die eine komplikationslose Verbindung mit der Rechentechnik erlauben. Der bisher noch benötigte Zwischenkreis zur Erzeugung des notwendigen Spannungs- und Leistungshubes für den Signalaustausch Schaltfehlerschutz – Primärgerät wird in den Steuerteil des Schaltgerätes verlagert. Standardisierte Signalanschlüsse geringer Steuerleistung bieten dann einfache und zuverlässige Anschlußmöglichkeiten.

### 3.4. Schaltfehlerschutzstruktur

Neben diesen Verfeinerungen wird eine Dezentralisierung der vor Ort lösbaren Schaltfehlerschutzaufgaben in Zukunft in der Schaltanlagentechnik an Dominanz gewinnen. Durch leistungsfähigere Mikroprozessoren wird das Konzept der in die Vor-Ort-Geräte delegierten Intelligenz nicht zuletzt aufgrund niedriger Kosten favorisiert. So stellt ein intelligent ausgeführtes Schaltfehlerschutzgerät ein in sich geschlossenes System dar, das ganz spezifisch auf die gestellten Anforderungen abgestimmt werden kann, wobei seine Fähigkeit, komplexe Aufgaben zu lösen, Leittechnikzentrale und Kommunikationskanäle entlastet. Somit muß die Anpassung an den Einsatzfall nicht mehr nur statisch mit der Zusammenstellung der Hardware festgeschrieben sein, sondern kann mittels optimie-

**Tafel 3.** Grundlagen eines pfadorientierten Algorithmus für den Schaltfehlerschutz

| Hauptbedingung 1. Baum | Hauptbedingung 2. Baum | Nebenbedingungen Belastung | Länge | Verbindungspfad | SG-Störstellung | $\Delta f$ | $\Delta U, \Delta\delta$ | Bemerkung | Freigabe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| geerdet | geerdet | - | | | | - | - | | ja |
| | getrennt | - | | | | - | - | | ja |
| | spannungslos | | | | | | | Einschaltsperre(SG) | |
| | spannungsführend | | | | | | | | nein |
| getrennt | geerdet | | | | | - | - | | ja |
| | getrennt | | | | | - | - | | ja |
| | spannungslos | | | | | - | - | Einschaltsperre(SG) | ja |
| | spannungsführend | | $< l_{zul}(SG)$ | | | - | - | | ja |
| spannungslos | geerdet | | | | | | | Einschaltsperre(SG) | |
| | getrennt | | | | | | | Einschaltsperre(SG) | ja |
| | spannungslos | | | | | | | Einschaltsperre(SG) | ja |
| | spannungsführend | $< I_{zul}(SG)$ | | | nicht im Stromweg | | | | ja |
| spannungsführend | geerdet | | | | | | | | nein |
| | getrennt | | $< l_{zul}(SG)$ | | | | | | ja |
| | spannungslos | $< I_{zul}(SG)$ | | | nicht im Stromweg | | | | ja |
| | spannungsführend | | $< l_{zul}(SG)$ | vorhanden | nicht im Verbindungspfad | $\approx 0$ | $< \Delta A_{zul}(SG)$ | Ausschaltsperre(SG) | ja |
| | | $< I_{zul}$ | | nein | nicht im Stromweg | $= 0$ | $< \Delta A_{zul}$ | nur bei LS ( Synchrocheck ) | ja |
| | | $< I_{zul}$ | | nein | nicht im Stromweg | $\approx 0$ | $< \Delta A_{zul}$ | nur bei LS ( Synchronisation ) | ja |
| | | $< I_{zul}$ | | | | $\neq 0$ | | ( asynchron ) | nein |
| | | $> I_{zul}$ | | nein | | | | ( Folgeauslösung ) | nein |

mit Hilfe der Netzleittechnik

innerhalb der Schaltanlage, wobei Leistungsschalter keine Trennstellen sind

mit Hilfe der Netzleittechnik ist Trennung in folgender Station bestimmbar

nur durch Spannungsmessung von spannungslos unterscheidbar, sonst spannungslos und spannungsführend als nicht getrennt zusammenfassen

$l_{zul}$ wird bestimmt durch:
- kapazitive Belastbarkeit
- Induktionsspannung
- Kommutierungsbedingungen

render Programme dynamisch an den aktuellen Zustand des Systems erfolgen.

Folgt man dagegen den Vorteilen eines pfadorientierten Schaltfehlerschutzes (Tafel 1), so läßt sich bei Beachtung der Anforderungen an Zuverlässigkeit, Sicherheit, Genauigkeit und Reaktionszeit eine Integration des Schaltfehlerschutzes in die Leittechnik erreichen. Die damit verbundene Begriffserweiterung scheint zulässig, da auch die bisher separaten Funktionen, wie der Synchroncheck oder die Belastungsabschätzung vor einer Schalthandlung, entstehende Fehlerzustände bei derselben, also Schaltfehler, vermeiden sollen (Tafel 3).

Softwareseitig bietet sich aufgrund der teilweise verschiedenen Ar-

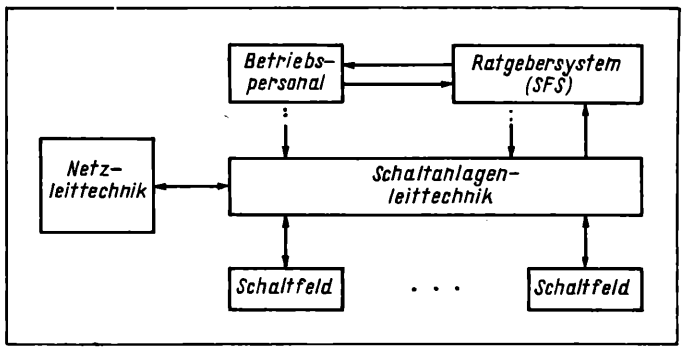



**Bild 5.** Ratgebersystem für den Schaltfehlerschutz

beitsweise der Algorithmen des Punktvergleiches und der Baumanalyse die Kombination als redundante Funktionsteile mit teilweiser Diversität an.

### 3.5. Ratgebersystem

Der Einsatz der pfadorientierten Verriegelungsalgorithmen gestattet den Ausbau des Schaltfehlerschutzes zu einem Ratgebersystem (Bild 5), mit dem z. B. diversitäre Redundanz beim Aufbau des Schaltzustandsabbildes zur Verfügung steht und Annahmen über den Status nicht in die Stellungsmeldung eingezogener Schaltgeräte ableitbar sind. In Tafel 3 sind die beiden letzten Fälle bei spannungsführenden Bäumen z. Z. noch nicht im Schaltfehlerschutz integriert. Unter Nutzung der Lastflußberechnung läßt sich aber als Zwischenstufe ein Ratgeber realisieren, der Folgeauslösungen vermeiden hilft. Als Endvariante ist ein vollautomatischer Schaltfehlerschutz vorstellbar, der mittels Datenaustausch über leistungsfähige Netzleittechnik unterschiedlichste Schaltaufgaben zuverlässig und sicher löst. Auf dem Weg dahin ermöglicht das Ratgebersystem die schnelle und aufwandsarme Einbindung neuer Funktionsmodule und ist eine flexible Ergänzung des Schaltfehlerschutzes. Die Entscheidungsverantwortung des Bedienpersonals wird damt allerdings weiter verringert, was die Aufmerksamkeit mindert und zu Handlungsunsicherheiten bei Funktionseinbußen des Ratgebersystems führt. Eine Applikation ist so auszulegen, daß der anlagenbezogene Schaltfehlerschutz selbständig arbeitet und die zusätzlichen Dienste wahlweise hinzugezogen werden.

## 4. Zusammenfassung

Auf Basis der an einen Schaltfehlerschutz zu stellenden Anforderungen wird der aktuelle Entwicklungsstand dieser wichtigen Schaltanlagenfunktion charakterisiert und gewertet. Dabei liegt ein Schwerpunkt auf der Systematisierung der Schaltgeräteverriegelung in schaltgeräte- und pfadorientierte Verfahren, wobei die Pfadorientierung anhand der leistungsfähigen Algorithmen des Punktvergleiches und der Baumanalyse erläutert wird. Die Vorteile dieser Algorithmen sind ihr geringer Speicherbedarf, die kurze Reaktionszeit, die einfache und schnelle Anpaßbarkeit sowie die Möglichkeit, zusätzliche Informationen zu berücksichtigen. Auf dieser Grundlage läßt sich unter Beachtung der Anforderungen an die Zuverlässigkeit, Sicherheit, Genauigkeit und Reaktionszeit eine Integration des Schaltfehlerschutzes in die Leittechnik erreichen. Zukünftig ist außerdem mit einem stärkeren Einfluß der künstlichen Intelligenz auf den Schaltfehlerschutz zu rechnen.

**Literatur**

[1] *Berthold, St.:* Überblick zu allgemeinen Anforderungen an den Schaltfehlerschutz aus dem Vergleich realisierter Applikationen. Bericht 803/90, TU Dresden, Sektion Elektrotechnik, WB Elektroenergietechnik

[2] *Bäsel, G.;* u. a.: Neuer Schaltfehlerschutz in der 220 kV-Schaltanlage Lubmin. ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 12, S. 456–462

[3] *Bauer, H.:* Entscheidungskriterien für die Entwicklung und für den Einsatz von mikrorechnergestützter Prozeßleittechnik für Umspannwerke. ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 11, S. 405–409.

EA 6225

# Die elektrische Energieversorgung in den 90er Jahren

Unter dieser Zielstellung fand am 26. und 27. September 1990 eine Vortragsveranstaltung der Forschungsgesellschaft Energie an der RWTH Aachen statt. Sie stand unter der bewährten Leitung von Univ.-Prof. Dr. techn. *K. W. Edwin* und hatte sich die Aufgabe gestellt, die elektrische Energieversorgung in den gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Wandlungsprozeß Europas mit integralen und dezentralen Wirkungen einzuordnen.

Durch die ab 1992 auch politisch geforderte verstärkte Zusammenarbeit im Rahmen des EG-Binnenmarktes werden für die westeuropäischen Verbundunternehmen neue Möglichkeiten der Kooperation aufgezeigt, aber auch Grenzen solcher Integrationsprozesse festgestellt. Ferner verlangt der Zusammenschluß beider deutscher Staaten ein langfristig richtiges, ökonomisch und ökologisch abgesichertes Konzept für die elektrische Energieversorgung Deutschlands. Diese Entwicklung wird auch zu wesentlich verstärkten energiewirtschaftlichen Kooperationsmöglichkeiten zwischen Ost- und Westeuropa führen.

Neben diesem integralen Wandel in Europa sind vor allem in der Bundesrepublik Deutschland Vorschläge zur Dezentralisierung der elektrischen Energieversorgung gemacht worden. Diese Konzepte verfolgen das Ziel, die Struktur der Versorgung zu verändern und eine verstärkte Erzeugung vor Ort durchzuführen. Dabei ist auch die Frage nach Risiko und Chancen eines Verzichts der Nutzung von Kernenergie mittel- und langfristig von besonderer Bedeutung. Der verstärkte Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung sowie der regenerativen Energiequellen stand ebenfalls zur Diskussion.

Von den Vortragenden wurden die sich in den 90er Jahren abzeichnenden Strukturveränderungen in der elektrischen Energieversorgung analysiert und Lösungsvorschläge für ökonomische und ökologische Verbesserungen dieses Prozesses vorgestellt. An dieser Veranstaltung nahmen mehr als 300 Fachkollegen des In- und Auslands aus Energiewirtschaft, Industrie und Hochschulen teil.

**Vorträge der Veranstaltung:**

Univ.-Prof. Dr. techn. *K. W. Edwin*, RWTH Aachen:
Die elektrische Energieversorgung – ein Evolutionsprozeß

Dr. *J. Greif*, EG-Kommission Brüssel:
Der Energie-Binnenmarkt der Gemeinschaft unter besonderer Berücksichtigung des Elektrizitätssektors

Dr.-Ing. *R. Bierhoff*, RWE Essen:
Die Stromversorgung in der Bundesrepublik Deutschland im Spannungsfeld zwischen energiepolitischen Zielvorstellungen und ihrer praktischen Bewährung

Dr.-Ing. *E. H. W. Kiwit*, VEW Dortmund:
Die Großverbundsysteme in Europa – Fakten und Grenzen

Dipl.-Ing. *L. Strauß*, BAG München:
Kooperationsmöglichkeiten zwischen den Elektroverbundsystemen in West- und Osteuropa

Univ.-Prof. Dr.-Ing. *H.-J. Haubrich*, RWTH Aachen:
Netzentwicklung im Wandel technischer und politischer Randbedingungen

Dr. jur. *E. Schmitz*, VDEW Frankfurt:
Rechtliche Determinanten örtlicher Energieversorgung

Dipl.-Ing. *H. Stumpf*, WIBERA Düsseldorf:
Die Energieversorgung der Gemeinden im Wandel

Direktor Dipl.-Ing. *G. J. M. Prieckaerts*, PLEM Maastricht:
Die Entwicklung der regionalen Energieversorgung der Niederlande

Dipl.-Ing. *J. Kreusel*, RWTH Aachen:
Kraft-Wärme-Kopplung und Photovoltaik: Konkurrenz oder Ergänzung?

Dipl.-Ing. *J. Dennermann*, VEW Dortmund:
Qualität der Spannungs- und Frequenzregelung im Vergleich von Großverbund- und Inselsystemen

Prof. Dr.-Ing. *P. Zenker*, Energieversorgung Oberhausen:
Aufgaben der städtischen Energieversorgung
Beispiel: Energieversorgung Oberhausen AG

Dr.-Ing. *D. Willbrand*, RWE Essen:
Kommunale Versorgung und Verbundwirtschaft

**G. Winkler**, Dresden

EK 4360

# Neuer Schaltfehlerschutz in der 220-kV-Schaltanlage Lubmin

**G. Bäsel, D. Feist, Leipzig; L. Hühr, Lubmin**

Der bisherige elektro-pneumatische Schaltfehlerschutz der 220- und 380-kV-Schaltanlagen Lubmin ist als Folge der vorgesehenen Trennerauswechslung durch einen neuen Schaltfehlerschutz auf Mikrorechnerbasis zu ersetzen. Die vorliegende Arbeit beschreibt den neuen Schaltfehlerschutz der 220-kV-Anlage, wobei der Schwerpunkt auf die Ausarbeitung der Freigabebedingungen gelegt wird. Der neue Schaltfehlerschutz der 380-kV-Schaltanlage ist entsprechend gestaltet.

## 1. Aufbau und Betrieb der 220-kV-Schaltanlage Lubmin [1]

Die 220-kV-Schaltanlage Lubmin ist dem Kernkraftwerk zugeordnet. Sie hat eine besondere Bedeutung für den sicheren Betrieb des Kernkraftwerkes, für die zuverlässige Leistungsabführung in das Verbundnetz und für die Versorgung des Landes Mecklenburg-Vorpommern. Eine Kupplung mit der benachbarten 380-kV-Schaltanlage existiert nicht.

In die 220-kV-Anlage speisen die Generatoren 1 bis 6 des Kernkraftwerkes mit einer Leistung von je 220 MW (Bild 1). Weiterhin sind kraftwerksseitig 6 Reservetransformatoren angeschlossen; mit ihnen wird der Kraftwerkseigenbedarf bei Kraftwerksstillstand bzw. die Anfahrleistung aus dem Verbundnetz sichergestellt.

Mit 3 Doppelleitungen ist die Anlage in das 220-kV-Netz eingebunden.

Die Schaltanlage ist in Reihen-Quer-Bauweise mit zwei Sammelschienen ausgeführt. Kraftwerksseitig existiert weiter eine Umgehungsschiene, die ausschließlich für Ersatzschalterbetrieb vorgesehen ist.

Zwei Vollkupplungen und eine Querkupplung gewährleisten hohe Freizügigkeit in der Betriebsweise der Schaltanlage. Eine feste Zuordnung der Sammelschienenabschnitte zu den Kupplungen existiert nicht.

Bild 2 zeigt die Schaltgeräte-Bestückung eines Leitungsabganges und einer Kupplung mit den beim Schaltfehlerschutz verwendeten Bezeichnungen.

## 2. Aufbau und Funktion des Schaltfehlerschutzes [3] bis [6]

Der bestehende Schaltfehlerschutz wirkt elektro-pneumatisch sowie in begrenztem Umfang auch mechanisch.

Die Umrüstung der Schaltanlage Lubmin von druckluftgesteuerten Trennern auf Trenner mit Motorantrieb erforderte demzufolge auch einen neuen Schaltfehlerschutz.

Um die hohen Anforderungen an die 220-kV-Schaltanlage Lubmin hinsichtlich Leistungsabführung und Eigenbedarfssicherung für das KKW Greifswald erfüllen zu können, wurde ein Schaltfehlerschutzsystem 8TK der Firma Siemens für die Schaltanlage vorgesehen.

Das von der Firma Siemens angebotene mikroprozessorgeführte Schaltfehlerschutzsystem 8TK ist zum elektrischen Steuerungs- und Antriebssystem der neu zu installierenden Trenner kompatibel und läßt sich gemäß den Forderungen des Auftraggebers bezüglich der Freigabebedingungen für die jeweiligen Schaltgeräte programmieren. Mit Hilfe der kundenspezifischen Programmierung ist ein nach menschlichem Ermessen nahezu 100%iger Schaltfehlerschutz erreichbar.

### 2.1. Einbau in bestehende Steuerschränke

Der Einbau der Geräte erfolgt je Schaltfeld in dem vorhandenen Steuerschrank (Bild 3).

Da der ursprüngliche Druckluftsteuerschrank nicht für die Aufnahme von elektronischen Geräten konzipiert war, wurde für den Einbau des Schaltfehlerschutzgerätes ein zusätzliches Schutzgehäuse notwendig. Das Gehäuse ist aus Stahlblech ausgeführt und mit dem Steuerschrank elektrisch leitend verbunden, wobei die Frontseite aus einer in einem Stahlblechrahmen gefaßten Glasscheibe besteht. Dieses Zusatzgehäuse bewirkt eine Erhöhung des Schutzes gegen Fremdkörper und Wasser sowie eine Herabsetzung von Beeinflussungs- und Störgrößen aus der Hochspannungsanlage.

*Zuordnung der Geräte zu den Schaltfeldern*

Jedem Abzweig ist ein Abzweiggerät zugeordnet. Die Abzweiggeräte sind über serielle Datenleitungen sternförmig mit einem Zentralgerät verbunden (Bild 1).

Das Zentralgerät ist in der Schaltanlage immer einem Kuppelfeld zugeordnet. In der 220-kV-Anlage wurde dafür die Kupplung AB vorgesehen.

An ein Zentralgerät des 8TK können maximal 32 Abzweiggeräte mit maximal 14 Schaltgeräten je Abzweiggerät angeschlossen werden. Da die Kupplung AB mehr als 14 Schaltgeräte besitzt, sind noch zwei Abzweiggeräte für diese Kupplung installiert worden. Alle anderen Abzweige und Kupplungen sind mit Abzweiggeräten bestückt.

### 2.2. Aufbau der Schaltfehlerschutzgeräte

Jedes Abzweiggerät besteht aus folgenden Baugruppen:
- Eingabe/Ausgabe-Baugruppe
- Bearbeitungseinheit Schaltfehlerschutz
- Stromversorgung
- Abriegel- und Betätigungsbaugruppe
- Freigabebaugruppe.

Das Zentralgerät besitzt neben allen Baugruppen der Abzweiggeräte zusätzlich noch:
- eine serielle Ankoppelbaugruppe
- eine vierfach Empfänger/Sender-Baugruppe
- 4er Anschlußeinheiten.

*Funktion des Schaltfehlerschutzes*

Im Schaltfehlerschutz sind folgende Funktionen integriert:
- Freigabe eines Schaltgerätes nur unter den vom Auftraggeber geforderten Bedingungen einschließlich Schlüsselschalter
- Ausgabe von Meldungen an die Warte
- Selbstüberwachung der Geräte und entsprechende Meldung der Fehlerursache.

Mit Hilfe der Schlüsselschalter S1–S4 kann vom Betreiber die Schalthoheit für bestimmte Schalthandlungen freigegeben werden.

In der Schaltanlage Lubmin wurden die Schlüsselschalter folgendermaßen belegt:
- S1 Aufhebung des Schaltfehlerschutzes, Notschaltbetrieb
- S2 Entriegelung des Erdungstrenners in Richtung Freileitung bei Freileitungsabzweigen
- S3 nicht belegt
- S4 wirkt analog zu S2 auf die übrigen Erdungstrenner.

Mit dem Schlüsselschalter S5 ist die Realisierung von Fernsteuerung/Ortssteuerung und AUS möglich.

## 3. Freigabebedingungen

Dem Grundkonzept des eingesetzten Schaltfehlerschutzes entsprechend darf eine Schalthandlung nur ausgeführt werden, wenn die Schalterstellungen der Schaltgeräte, die für die Schalthandlung

Dr.-Ing. *Gerhard Bäsel* ist Fachgebietsleiter, und Dipl.-Ing. *Dirk Feist* ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Energetik Leipzig. Ing. *Lothar Hühr* ist Gruppenleiter im KKW Lubmin.

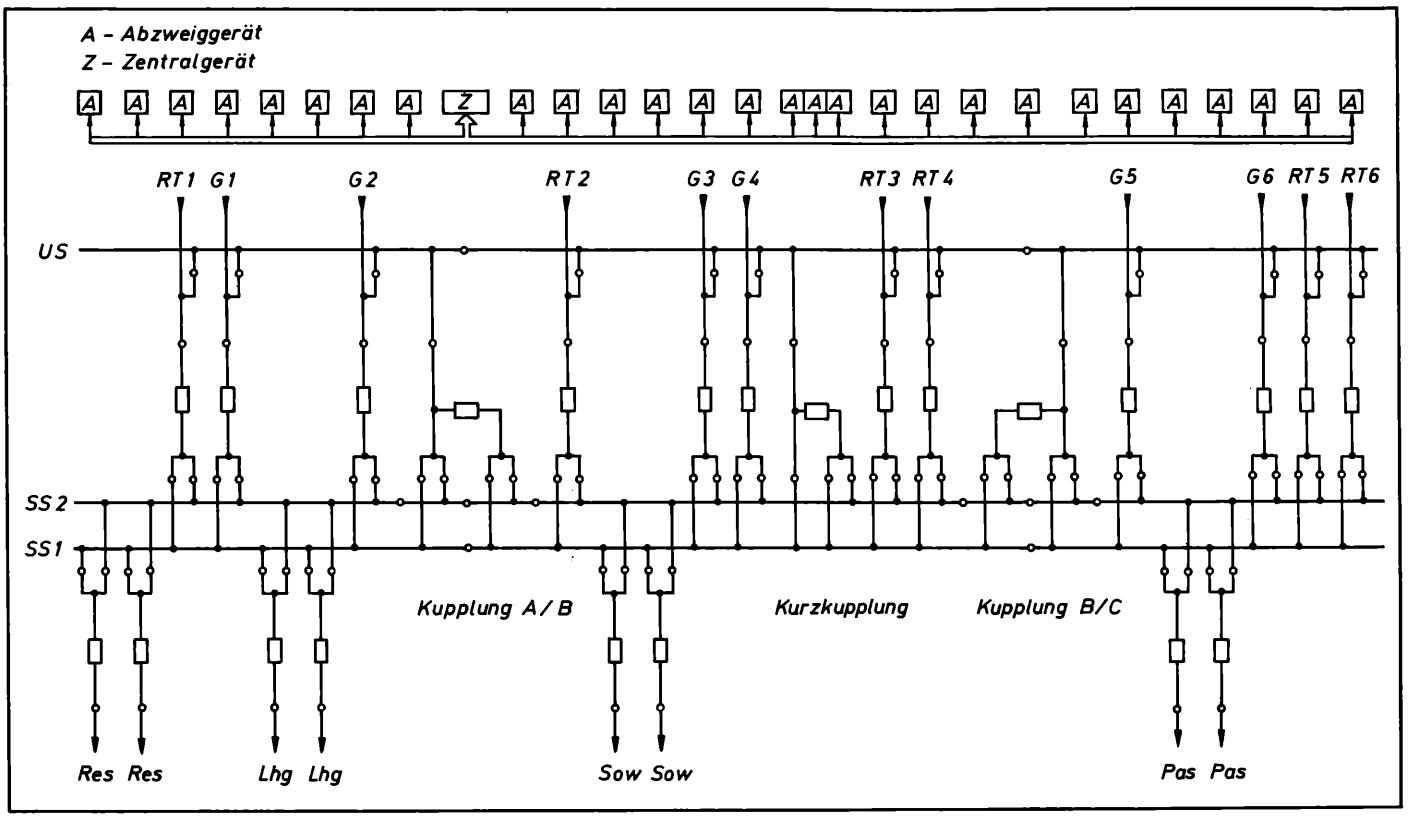



**Bild 1.** Übersichtsplan der 220-kV-Schaltanlage und Zuordnung der Schaltfehlerschutzgeräte zu den Feldern

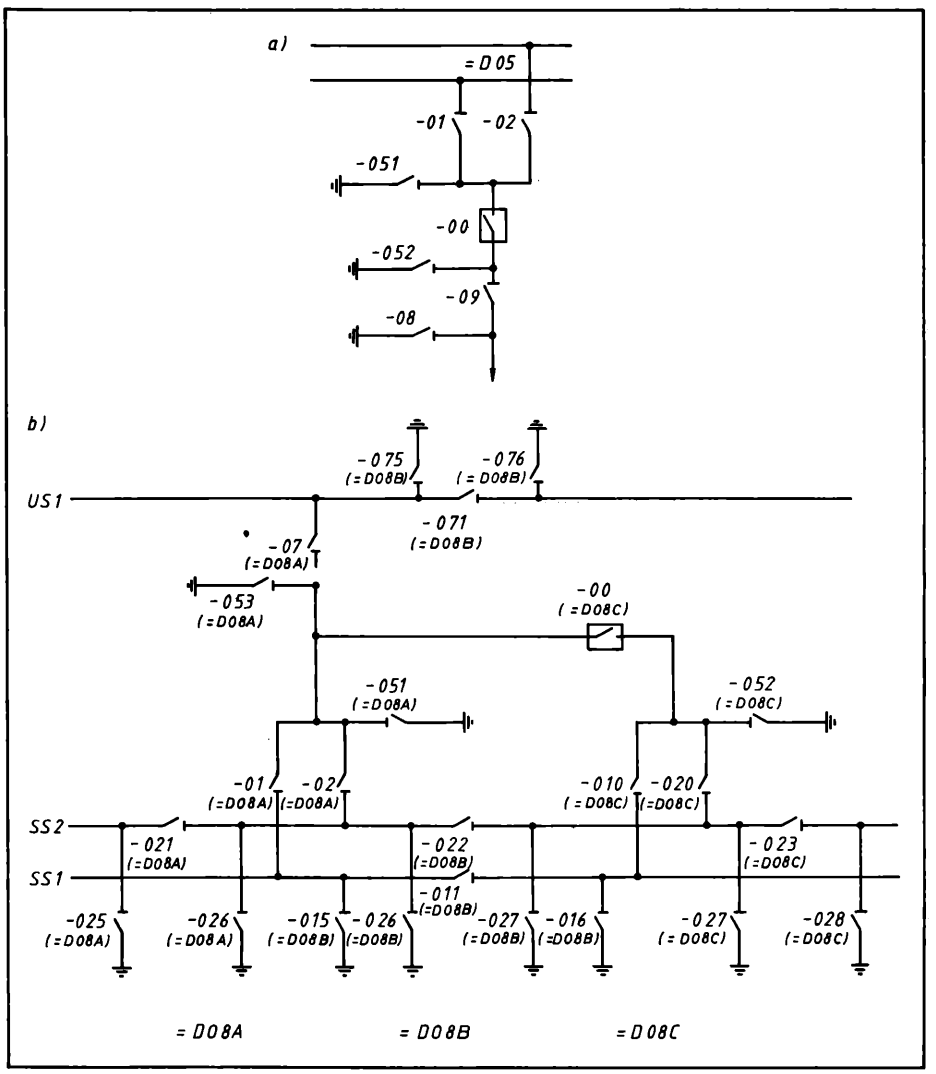
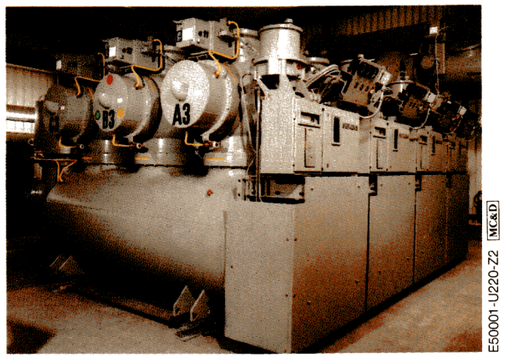



**Bild 2.** Schaltgeräte-Ausstattung [10]
a) eines Leistungsabganges
b) einer Kupplung

**SIEMENS**

# In 20 Jahren wird er die erste Revision durchführen



E50001-U220-Z2 MC&D

20 Jahre – zwei Jahrzehnte – eine lange Zeit ...
Für die meisten Schaltanlagen zu lange,
um ohne Revision zu arbeiten.

Aber nicht für $SF_6$-isolierte Schaltanlagen
von Siemens.
Denn sie zeichnen sich aus durch:

- Einsatz hervorragender Werkstoffe
- extreme Gasdichtigkeit
- außergewöhnliche Leistungsfähigkeit
- ausgereifte Schalttechnik

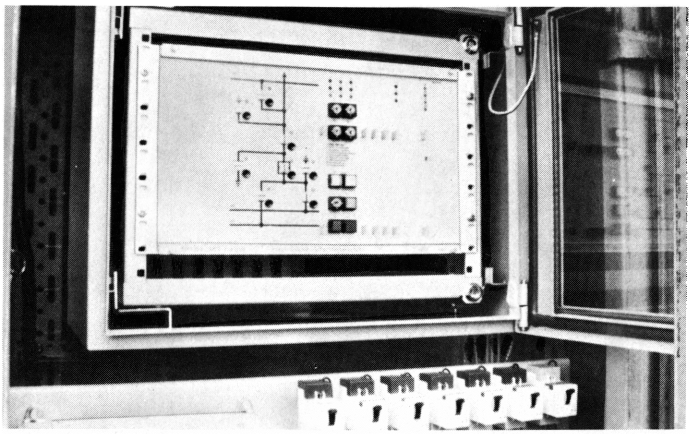
Daher brauchen Sie ihn erst in 20 Jahren.

Warum sollten Sie sich für weniger entscheiden?

Auf Zukunft schalten.
$SF_6$-isolierte Schaltanlagen
von Siemens.

Weitere Informationen
erhalten Sie von:

Siemens AG, Infoservice EV/Z 198
Postfach 2348, D-8510 Fürth



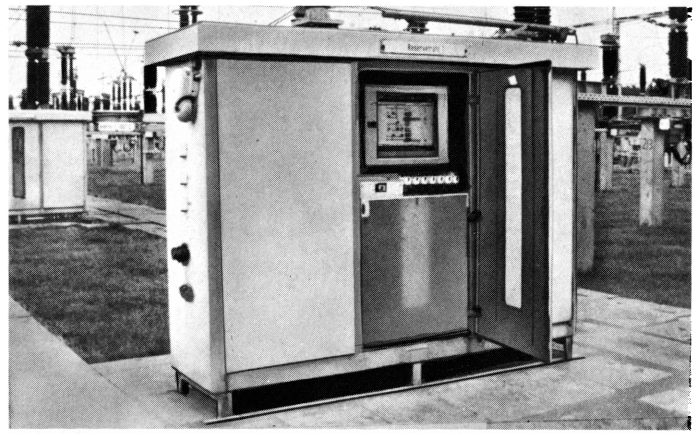


**Bild 3.** Steuerschrank für den Einbau des Schaltfehlerschutzgerätes

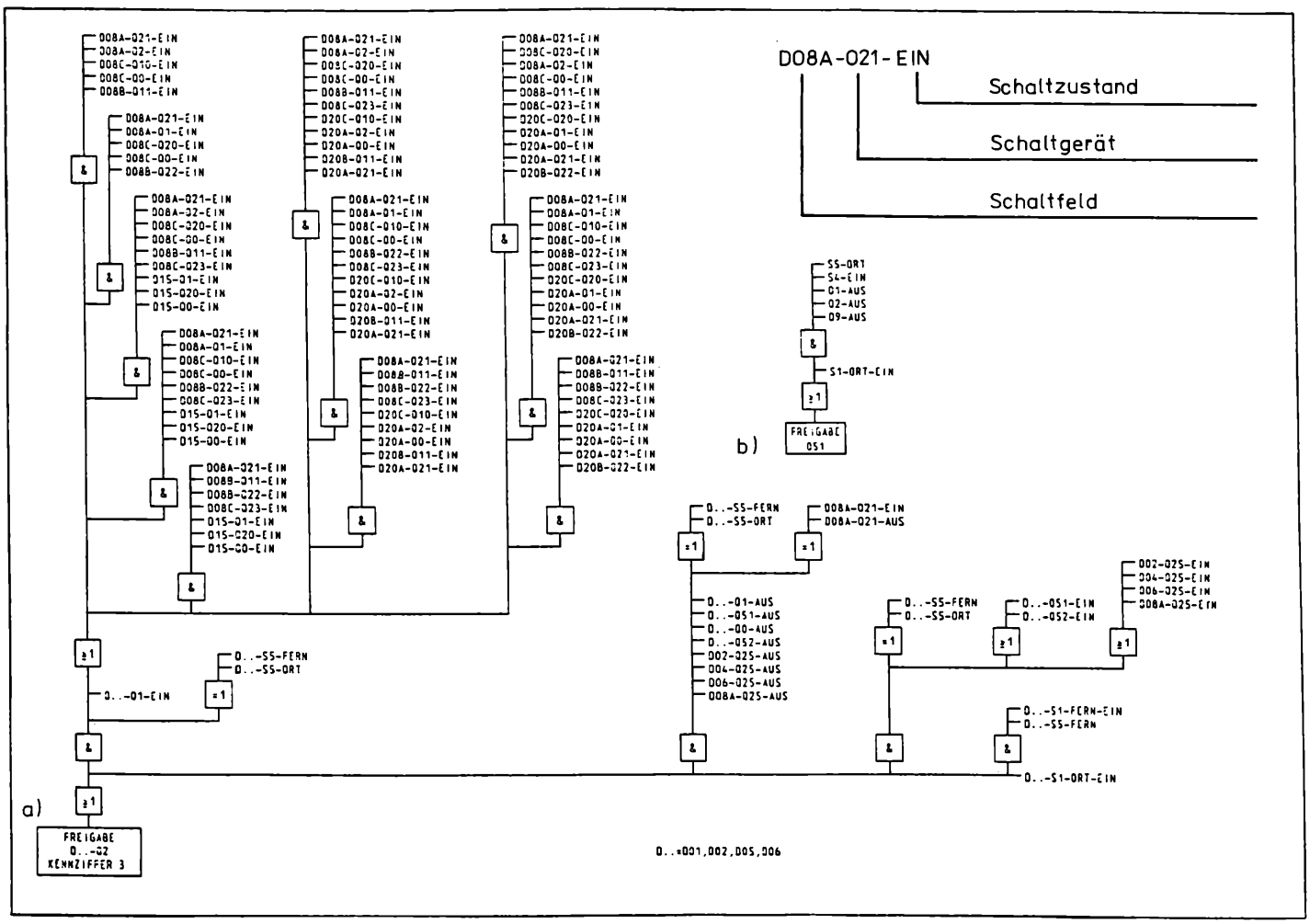



**Bild 4.** Freigabelogik; a) eines Sammelschienentrenners; b) eines Erdungstrenners

relevant sind, den in Tabellen niedergelegten Kombinationen entsprechen. Diese Freigabebedingungen wurden auf der Grundlage der konventionellen Verriegelungsbedingungen ausgearbeitet [1] [2] [6] bis [9], unter Beachtung der erweiterten Möglichkeiten des elektronischen Schaltfehlerschutzes und der spezifischen Bedingungen der Schaltanlage Lubmin.

Bei der Formulierung der Freigabebedingungen wurde Wert auf ein in sich geschlossenes, einfach überschaubares und für das Schaltpersonal stets nachvollziehbares System von Freigaberegeln gelegt. Das ist wichtig sowohl für die Bewertung der folgerichtigen Arbeit des Schaltfehlerschutzes als auch für die Vermeidung von evtl. durch entriegelte Schalthandlungen bedingte unzulässige Ausgangsschaltzustände für weitere Schaltungen.

Die allgemeinen Freigabebedingungen wurden zunächst verbal formuliert und danach für die einzelnen Schaltgeräte in spezielle Freigabebedingungen und in die sog. Freigabelogik umgesetzt.

Nachstehend werden die allgemeinen Freigabebedingungen für die Schaltgeräte mitgeteilt. Auf die Schlüsselschalterbedingungen (Entriegelung, Fern/Ort usw.) wird in diesem Zusammenhang nicht eingegangen.

Für die Koordinierung der Freigabebedingungen der Schaltgeräte untereinander wird der Begriff des Anlagenknotens eingeführt. Als Anlagenknoten im Sinne dieser Arbeit gilt jeder galvanisch zusammenhängende Teil der Schaltanlage, wenn alle Trenner geöffnet sind. Leistungsschalter gelten stets, auch wenn sie ausgeschaltet sind, als eine galvanische Verbindung.

*Erdungstrenner öffnen und schließen*

Erdungstrenner dürfen nur geöffnet oder geschlossen werden, wenn die Trenner des betreffenden Anlagenknotens geöffnet sind (Bild 4b).

Erdungstrenner werden nur vor Ort betätigt, ihre Steuerung von der Warte ist nicht vorgesehen.

*Trenner öffnen und schließen*
Trenner werden freigegeben, wenn folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

1. An beiden zugehörigen Anlagenknoten müssen sämtliche Erdungstrenner geöffnet sein
2. Mindestens auf einer Seite des zu betätigenden Trenners muß durch Schalterstellungen die Lastfreiheit gesichert sein (Abweichung hiervon nur bei Abgangstrennern im Leitungsfeld, wo die Stellungsmeldung des Trenners auf der Gegenseite nicht verfügbar ist)
3. Für Sammelschienentrenner wird zusätzlich gefordert, daß die Längstrenner des betreffenden Sammelschienenabschnittes eindeutige Endstellung haben.

Trenner werden weiter freigegeben, wenn die beiden Anlagenknoten anderweitig miteinander verbunden sind. Beispiel dafür ist die Freigabe des zweiten Sammelschienentrenners bei Sammelschienenwechsel, wenn die beiden Sammelschienen gekuppelt sind.
Schließlich werden Trenner unabhängig von weiteren Bedingungen freigegeben, wenn an den beiden Anlagenknoten mindestens je ein Erdungstrenner geschlossen ist.
Ein Beispiel für die Freigabelogik eines Sammelschienentrenners in einem Leitungsabzweig auf Block A zeigt Bild 4a.
*Leistungsschalter einschalten*
Die Freigabebedingungen verhindern, daß in Störstellung befindliche Trenner belastet werden können.
Freigabe erfolgt, wenn alle Trenner im eigenen Feld eindeutige Endstellung haben, maximal 1 Sammelschienentrenner des eigenen Feldes geschlossen ist sowie alle Längstrenner im angeschlossenen und (über Längstrenner) zusammengeschalteten Teil der Sammelschienen eindeutige Endstellung haben.
Freigabe ohne weitere Bedingungen erfolgt, wenn der Stromkreis auch nach dem Einschalten des Leistungsschalters geöffnet bleibt (z. B. durch geöffnete Sammelschienentrenner).
*Leistungsschalter ausschalten*
Ist kein Parallelzweig vorhanden, wird der Leistungsschalter ohne weitere Bedingungen freigegeben.
Existiert ein Parallelzweig, so wird der Leistungsschalter nur freigegeben, wenn alle Schaltgeräte im Parallelzweig eindeutige Schaltstellung besitzen (Schutz gegen Belastung von Schaltgeräten in Störstellung).
Kuppelschalter dürfen nur ausgeschaltet werden, wenn alle Sammelschienentrenner und Längstrenner in dem von der Kupplung erfaßten Bereich eindeutige Endstellung haben und wenn in keinem Abzweig mehr als ein Sammelschienentrenner geschlossen ist.
Aus der Gesamtmenge der sich aus vorgenannten Bedingungen herleitenden möglichen Schaltzustände wurden nur die in die speziellen Freigabebedingungen übernommen, die bei üblichen bzw. vorgeschriebenen Schaltfolgen vorkommen.
Damit wird die Freizügigkeit des Schaltzustandes der Anlage nicht eingeengt, es werden jedoch bestimmte Schaltfolgen, die teilweise auch in Betriebsvorschriften niedergelegt sind, erzwungen (z. B. Schaltfolge bei Aufnahme des Umgehungsschienenbetriebes).

## 4. Darstellungsform und Hilfsmittel

Die Freigabelogik (Bilder 4a und 4b) ist eine beim Hersteller gebräuchliche übersichtliche und damit leicht kontrollierbare Darstellungsform. Die Freigabelogiken werden nach den Vorgaben bzw. Entwürfen des Auftraggebers vom Hersteller auf dem Rechner generiert. Die weitere Umsetzung, bis zur EPROM-Programmierung, erfolgt maschinell, so daß auf diesem Wege Fehler nicht entstehen können.
Letzte Kontrollmöglichkeit auf inhaltliche Richtigkeit der Freigabelogik ist somit die Durchsicht der grafischen Darstellungen.
Anliegen der Bearbeitung ist es natürlich, Fehler bei den Vorgaben und bei der Aufstellung der Freigabelogiken erst gar nicht entstehen zu lassen.
Für die Abzweigverriegelung ist das gegeben. Die verbal formulierten Freigabebedingungen sind ohne weitere Hilfsmittel in einfacher und sicherer Weise auf die Freigabelogiken umsetzbar.

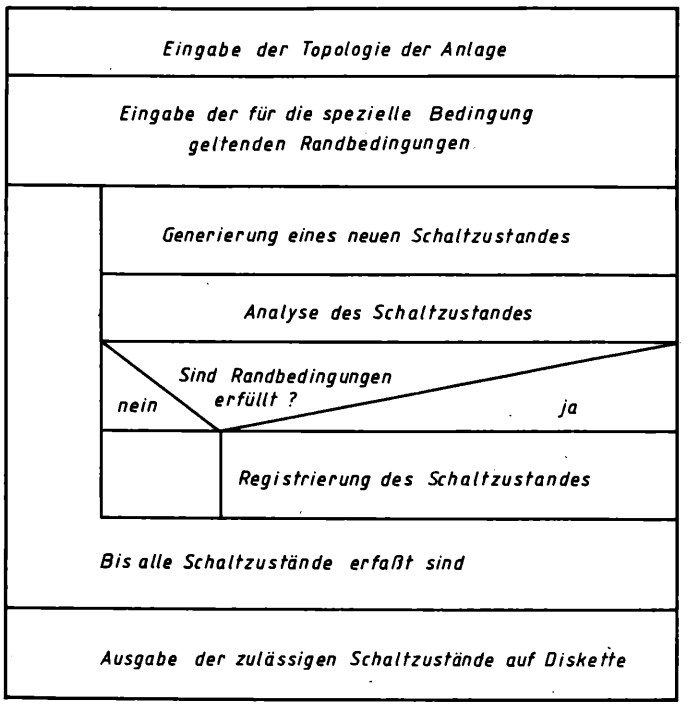



**Bild 5.** Struktogramm zur Ermittlung der zulässigen Schaltzustände für Kupplungs- und sonstige Verbindungsbedingungen

Erheblich komplizierter ist es dagegen bei der Größe der Anlage und bei dem geforderten Umfang der Freigabebedingungen, die über bisher realisierte Referenzvorhaben hinausgehen, die Freigabelogiken für die Anlagenverriegelung aufzustellen.
Sehr umfangreich und deshalb ohne Hilfsmittel kaum mehr handhabbar sind die Kupplungs- und sonstigen Verbindungsbedingungen. Sie werden z. B. für den Sammelschienenwechsel von Abzweigen und ähnliche Schalthandlungen benötigt, bei denen durch das Programm parallele Stromschleifen zu identifizieren sind.
Für die Kupplungs- und sonstigen Verbindungsbedingungen als ein wesentlicher Teil der Anlagenverriegelung wurde deshalb ein PC-Programm entwickelt und eingesetzt (Bild 5).
Als Beispiel sei die Kupplungsbedingung für den Sammelschienenwechsel auf den Sammelschienen 1 und 2 des Blockes A der Anlage betrachtet.
Die Randbedingungen für diesen Fall sind:

- Die Sammelschienen 1 und 2 müssen bezüglich des Blockes A galvanisch verbunden sein
- Die galvanische Verbindung muß über mindestens einen Kuppelschalter hergestellt sein
- Die Verbindung darf nicht über zwei geschlossene Sammelschienentrenner eines Feldes bestehen
- Die Verbindung unter Inanspruchnahme der Umgehungsschiene ist unzulässig. (Die Umgehungsschiene dient ausschließlich dem Ersatzschalterbetrieb.)

Das Programm prüft alle möglichen Schaltzustände, ob die genannten Randbedingungen erfüllt sind, und zwar mit einem Minimum geschlossener Schalter. Das heißt, daß für die jeweilige Kupplungsbedingung nicht relevante Schalterstellungen nicht berücksichtigt werden. Es werden demzufolge als zulässige Schaltzustände die Mindestmengen der Schaltgeräte ermittelt, die geschlossen sein müssen, um die Kupplungsbedingung zu erfüllen.
Für das Beispiel ergeben sich so 11 zulässige Schaltzustände (Regeln), nach denen ein Sammelschienenwechsel durchgeführt werden kann (Tabelle 1). Die Stellung der in den Datenblöcken nicht aufgeführten Schaltgeräte ist dabei gleichgültig. Ist keiner dieser 11 Schaltzustände gegeben, wird der Sammelschienenwechsel durch den Schaltfehlerschutz gesperrt.
Insgesamt werden für die Anlagenverriegelung der 220-kV-Schaltanlage 12 Kupplungsbedingungen benötigt. Die Zahl der berechneten zulässigen Schaltzustände je Kupplungsbedingung liegt dabei zwischen 3 und 26 (Tabelle 2).
Das PC-Programm zur Ermittlung der Schalterfreigaben wurde in

**Tafel 1.** Zulässige Schaltzustände (Regeln) für die Kupplungsbedingung SS1 – SS2, bezogen auf Block A

| Regel 1 | Regel 2 | Regel 3 | Regel 4 | Regel 5 | Regel 6 |
|---|---|---|---|---|---|
| DO8A-Q21-E | DO8A-Q21-E | DO8A-Q21-E | DO8A-Q21-E | DO8A-Q21-E | DO8A-Q21-E |
| DO8A-Q2 -E | DO8A-Q1 -E | DO8A-Q2 -E | DO8A-Q1 -E | DO8A-Q11-E | DO8A-Q2 -E |
| DO8C-Q10-E | DO8C-Q20-E | DO8C-Q20-E | DO8C-Q10-E | DO8B-Q22-E | DO8C-Q20-E |
| DO8C-Q0 -E | DO8C-Q0 -E | DO8C-Q0 -E | DO8C-Q0 -E | DO8C-Q23-E | DO8C-Q0 -E |
| DO8B-Q11-E | DO8B-Q22-E | DO8B-Q11-E | DO8B-Q22-E | D15 -Q0 -E | DO8B-Q11-E |
| | | DO8C-Q23-E | DO8C-Q23-E | D15 -Q1 -E | DO8C-Q23-E |
| | | D15 -Q0 -E | D15 -Q0 -E | D15 -Q20-E | D20A-Q2 -E |
| | | D15 -Q0 -E | D15 -Q1 -E | | D20C-Q10-E |
| | | D15 -Q20-E | D15 -Q20-E | | D20A-Q0 -E |
| | | | | | D20B-Q11-E |
| | | | | | D20A-Q21-E |

| Regel 7 | Regel 8 | Regel 9 | Regel 10 | Regel 11 |
|---|---|---|---|---|
| DO8A-Q21-E | DO8A-Q21-E | DO8A-Q21-E | DO8A-Q21-E | DO8A-Q21-E |
| DO8A-Q1 -E | DO8B-Q11-E | DO8A-Q2 -E | DO8A-Q1 -E | DO8B-Q11-E |
| DO8C-Q10-E | DO8B-Q22-E | DO8C-Q20-E | DO8C-Q10-E | DO8B-Q22-E |
| DO8C-Q0 -E | D08C-Q23- E | DO8C-Q0 -E | DO8C-Q0 -E | DO8C-Q23-E |
| DO8C-Q22-E | D20A-Q2 - E | DO8C-Q11-E | DO8B-Q22-E | D20A-Q1 -E |
| DO8C-Q23-E | D20C-Q10- E | D08C-Q23- E | DO8C-Q23-E | D20C-Q20 -E |
| D20A-Q2 -E | D20A-Q0 - E | D20A-Q1 - E | D2OA-Q1 -E | D2OA-Q0 -E |
| D2OC-Q10-E | D20B-Q11- E | D20C-Q20- E | D2OC-Q20-E | D20A-Q21 -E |
| D2OA-Q0 -E | D2OA-Q21-E | D2OA-Q0 -E | D2OA-Q0 -E | D2OB-Q22-E |
| D20B-Q11-E | | D2OA-Q21-E | D2OA-Q21-E | |
| D20A-Q21-E | | D2OB-Q22-E | D2OB-Q22-E | |

TURBO-PASCAL geschrieben. Die Rechenzeiten (A 7150) liegen je nach Zahl der beteiligten Schaltgeräte zwischen wenigen Minuten und mehreren Stunden. Da die Rechnung nur einmal je Kupplungs- bzw. sonstiger Verbindungsbedingung durchgeführt werden muß, ist die Rechenzeit von untergeordneter Bedeutung.

**Tafel 2.** Für die Anlagenverriegelung benötigte Kupplungsbedingungen

| Gekuppelte Sammelsch. | bezogen auf | Zahl der Regeln | Bemerkungen |
|---|---|---|---|
| SS1 – SS2 | Block A | 11 | sämtl. Kuppelsch. |
| SS1 – US | Block A | 23 | sämtl. Kuppelsch. |
| SS2 – US | Block A | 26 | sämtl. Kuppelsch. |
| SS1 – SS2 | Block B | 5 | sämtl. Kuppelsch. |
| SS1 – US | Block B | 13 | sämtl. Kuppelsch. |
| SS2 – US | Block B | 13 | sämtl. Kuppelsch. |
| SS1 – SS2 | Block C | 11 | sämtl. Kuppelsch. |
| SS1 – US | Block C | 23 | sämtl. Kuppelsch. |
| SS2 – US | Block C | 26 | sämtl. Kuppelsch. |
| SS1 – SS2 | Block B1 | 3 | ohne Kuppelsch. A/B |
| SS1 – SS2 | Block B2 | 3 | ohne Kuppelsch. B/C |
| SS1 – SS2 | Block B | 4 | ohne Querkuppelsch. |

## 5. Prüfung und Inbetriebnahme

### 5.1. Prüfung vor der Auslieferung

Die Erstellung der Freigabelogik gemäß den vom Auftraggeber vorgegebenen Freigabebedingungen für jedes Schaltgerät erfolgte, wie bereits dargestellt, an einem Bildschirmarbeitsplatz beim Hersteller. Diese Freigabelogik wurde dem Auftraggeber in Form einer Dokumentation [10] vorgelegt und von diesem bestätigt.

Die sich daran anschließende Programmierung der EPROM für den Schaltfehlerschutz erfolgte ausschließlich maschinell, so daß Dokumentation und EPROM-Inhalt identisch sind.

Bei der Geräteabnahme im Werk wird ein stichprobenartiger Test der Schaltgerätefreigaben mit Hilfe eines Simulationsstandes vorgenommen. Dieser Stand ermöglicht die Überprüfung prinzipiell jeder Verriegelung, da jeder Schaltzustand der Schaltanlage simuliert werden kann. Aus zeitlichen Gründen ist das aber nur bei kleinen Anlagen möglich.

Alle Geräte durchlaufen außerdem die Stufen der Qualitätssicherung des Herstellers. Jeder EPROM wird von der Geräteabnahme einem umfangreichen Testprogramm unterzogen. Dadurch werden u. a. folgende formale Fehler erkannt (Plausibilitätskontrolle):

- Schaltgerätebezeichnungen, denen kein Schaltgerät in der Schaltanlage zugeordnet werden kann (Schreibfehler)
- Schaltgerät mit Schaltstellungen EIN und AUS in einer UND-Vernüpfung

### 5.2. Prüfungen am Einbauort

Nach Abschluß aller Montagearbeiten erfolgt am Einbauort eine umfangreiche Funktionsprüfung des Schaltfehlerschutzgerätes. Dabei werden mit einem vom Auftraggeber erarbeiteten Funktionsprüfprogramm folgende Schwerpunkte geprüft:

- Eigentest des Schaltfehlerschutzgerätes
- Meldungen am Schaltfehlerschutzgerät
- Zuordnung bzw. Stellungsmeldung der Schaltgeräte zur Bestätigungsbaugruppe und zum Steuerquittierschalter der Warte
- Meldung auf der Freigabebaugruppe
- Kontrolle der programmierten Freigabebedingungen
- Schlüsselschalterfunktionen.

Zur Verhinderung einer unbeabsichtigten Betätigung von Schaltgeräten bei der Funktionsprüfung, bedingt durch Klemmfehler, Erdschluß usw. werden alle Schaltgeräte blockiert. Nur das jeweilige Schaltgerät wird zur Ansteuerung freigegeben.

## Inbetriebnahme

Da die Trennerauswechslung in der 220-kV-Schaltanlage schrittweise vorgenommen wird, ist auch ein stufenweiser Einbau des Schaltfehlerschutzes 8TK notwendig. Während der gesamten Einbauphase ist kein umfassender Schaltfehlerschutz in der Anlage wirksam. Für das Schaltpersonal bedeutet das in dieser Zeit erhöhte Anforderungen an ihre Aufmerksamkeit und Fachkenntnis.

**Literatur**


[1] Betriebsvorschriften des KKW für die 220-kV-Schaltanlage Progr. BV-EO21
[2] Betreiben von Schaltanlagen. VEB Verbundnetz Elektroenergie, 2. 9. 1988
[3] *Niebergall, H.:* Schaltfehlerschutz für Stromverteilungsanlagen aller Spannungsebenen. Siemens-Energietechnik 3 (1981) 1, S. 20–23
[4] *Grohmann, W.; Kommutat, G.; Niebergall, H.:* Neues, elektronisches Schaltfehlerschutzgerät. Siemens-Energietechnik 5 (1983) 2, S. 93–96
[5] *Veenstra, H.; Westerholt, H.:* Zukunftsweisende Leittechnik für Schaltanlagen auf Mikroprozessorbasis. Elektrizitätswirtschaft 85 (1986) 20, S. 772–775
[6] Firmenprospekte und andere Unterlagen der Fa. Siemens zur Schaltanlagen-Leittechnik
[7] *Proske, D.:* Matrixdarstellung der Schaltgleichungen für den mikrorechnergestützten Schaltfehlerschutz in Hochspannungs-Umspannwerken. Wiss. Berichte der TH Zittau, Nr. 97, 15 (1988)
[8] *Guericke, R.; Henkel, G.:* Betriebsführung eines Umspannwerkes mit rechnergestützter Steuerungs- und Überwachungstechnik. Das Verbundnetz 22 (1987) 44, S. 1092–1095
[9] *Czybik:* Beschreibung der technischen Lösung einer Trainingsanlage SIS/HS. OBSAD, 1. 3. 1989 (nicht veröffentlicht)
[10] Dokumentation zum Schaltfehlerschutz der 220-kV-Schaltanlage Lubmin. Siemens 1989/90


EA 6217

# Störbeeinflussungsmessungen an Steuerkabeln einer 220-kV-Schaltanlage zur Abschätzung der EMV beim Einsatz mikroelektronischer Geräte

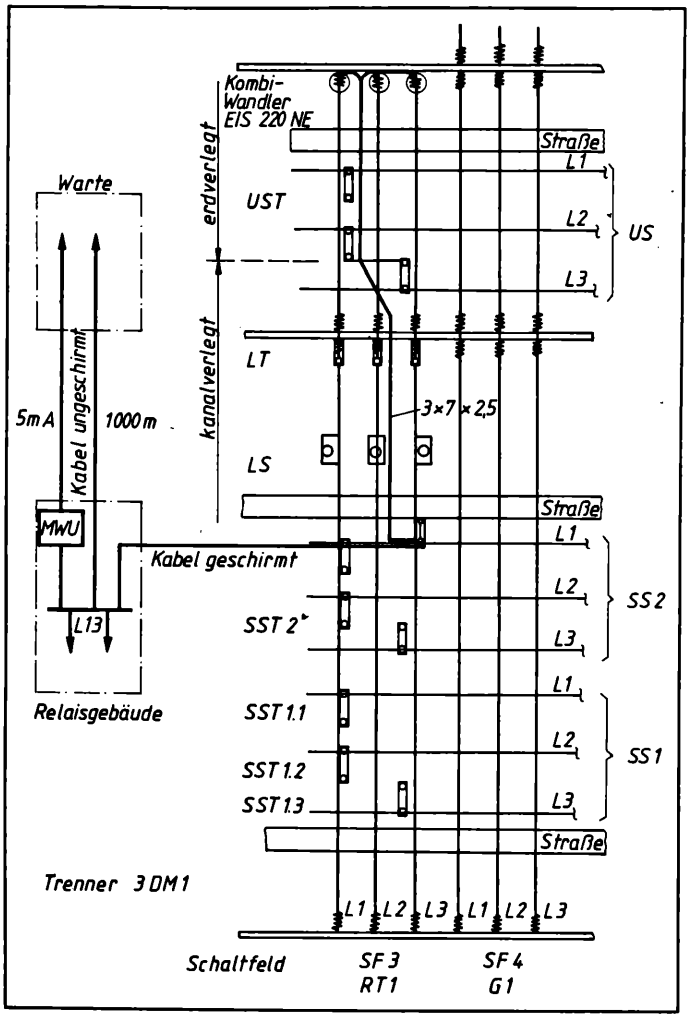
**H. Bauer, Dresden; A. Diessner, Berlin; W. Schwirkslies, Greifswald**

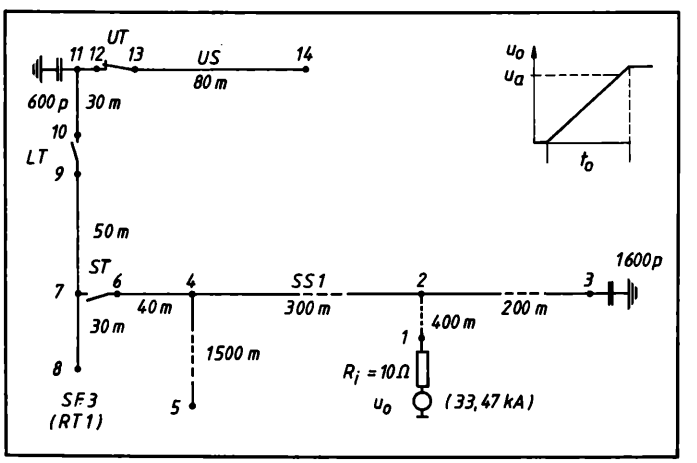
Bei der Rekonstruktion der 220-kV-Schaltanlage sind die Trennschalter auszuwechseln [1]. Der bisher mit Hilfe von Druckluftsteuergeräten realisierte Schaltfehlerschutz ist zu erneuern. Die hierfür einzusetzenden Schaltfehlerschutzgeräte [2] [3] basieren auf mikroelektronischen Schaltungen. Die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Schaltfehlerschutzes setzt die Beherrschung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) voraus [4] [5] [6]. Die Störfestigkeit der Geräte wird durch konzeptionelle und konstruktive Maßnahmen erreicht [7] [8] [9] und durch internationale Prüfnormen nachgewiesen [10] bis [15]. Um die EMV einschätzen zu können, wurde die Störbelastung in der Schaltanlage an den Schnittstellen zwischen den Steuerkabeln und den elektronischen Geräten gemessen [16].

## 1. Störquellen und Störfestigkeit

Jedes Schaltfehlerschutzgerät wird im Freiluft-Steuerschrank eines Schaltfeldes der Hochspannungs-Schaltanlage montiert. Von den möglichen elektromagnetischen Störbeeinflussungen [17] haben elektrostatische Entladungen (ESD) und kapazitive Störeinkopplungen von impulsförmigen Störgrößen große praktische Bedeutung. Während bei ESD Meßergebnisse aus anderen Bereichen des Leittechnikeinsatzes übertragbar sind, werden die charakteristischen Größen der impulsförmigen Störspannungen meistens von der Topologie der Schaltanlage mitbestimmt.

Dr.-Ing. *Hartmut Bauer* ist o. Hochschuldozent an der Technischen Universität Dresden, Institut für Elektroenergieversorgung, Dipl.-Ing. *Armin Diessner* ist Mitarbeiter der Siemens AG, Schaltwerk Hochspannung Berlin, Versuchsfeld Hochspannung, und Dipl.-Ing. *Wilfried Schwirkslies* ist Gruppenleiter im Kernkraftwerk Greifswald, Energiewerke Nord AG.



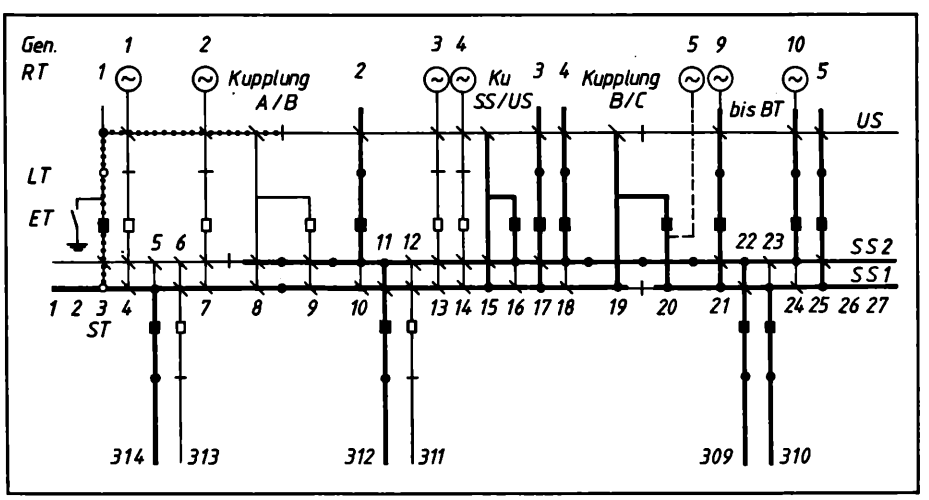




**Bild 1.** Grundschaltplan der 220-kV-Schaltanlage; BT Blocktransformator, ET Erdungstrenner, LT Leitungstrenner, RT Reservetransformator, SS$v$ Sammelschiene $v$, ST Sammelschienen-Trenner, US Umgehungsschiene

**Bild 2.** Lageplan der Steuerkabel im Schaltfeld; G Generator, L Leiter, LS Leistungsschalter, LT Leitungstrenner, RT Reservetransformator, SS$v$ Sammelschiene, SST$v\mu$ Sammelschienentrenner der Sammelschiene $v$, Leiter $\mu$, US Umgehungsschiene, UST Umgehungsschienentrenner

**Bild 3.** Ersatzschaltbild für die Wanderwellenberechnung; LT Leitungstrenner, RT Reservetransformator, SF Schaltfeld, SS$v$ Sammelschiene $v$, ST Sammelschienentrenner, UT Umgehungsschienen-Trenner,
$C' = 16{,}8\,\mathrm{nF/km}$ $L' = 815\,\mu\mathrm{H/km}$
$t_o = 100\,\mu\mathrm{s}$ $u_a = (\sqrt{2}/\sqrt{3})\,240\,\mathrm{kV}$
$v = 270\,\mathrm{m/\mu s}$ $Z_w = 220\,\Omega$

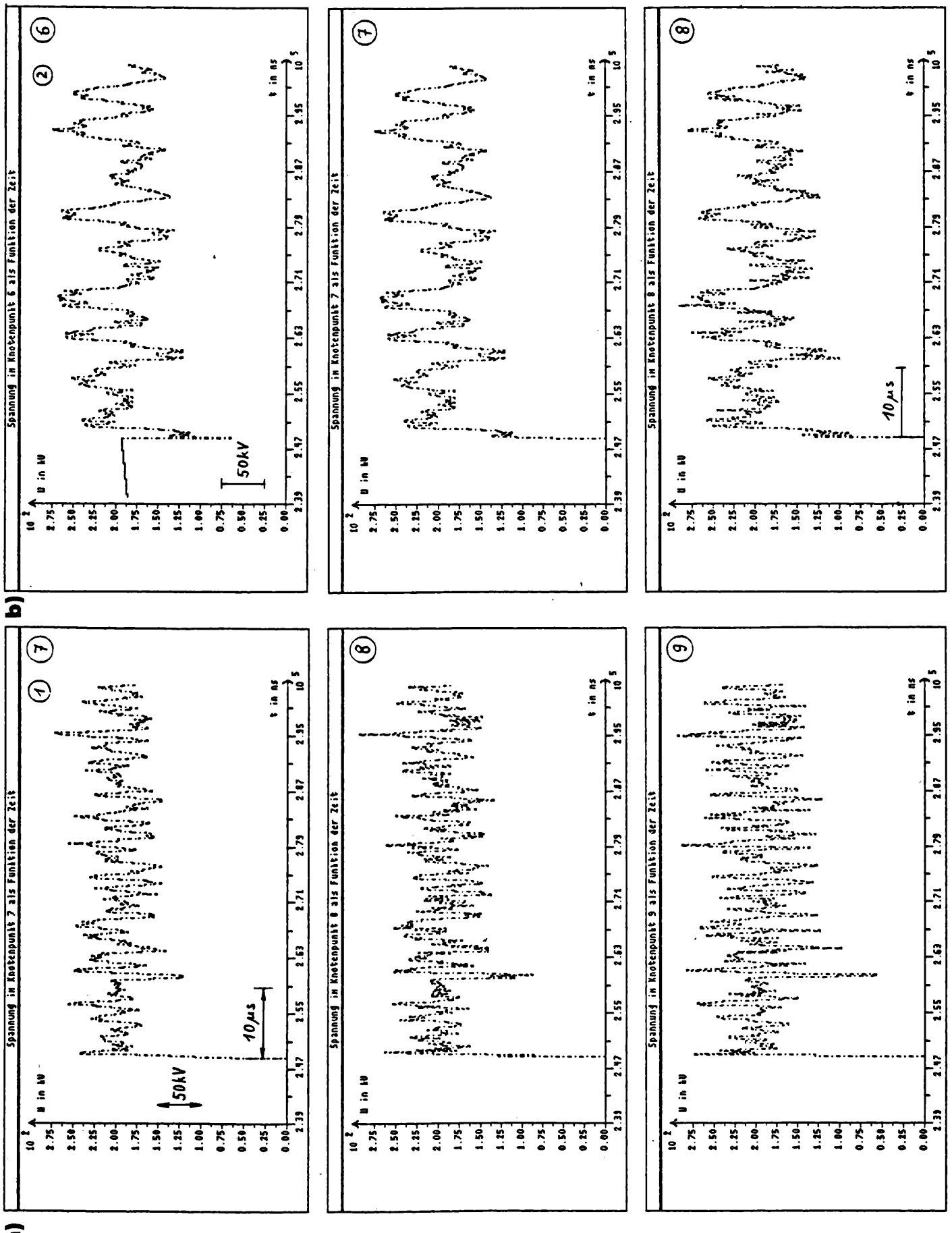



**Bild 4.** Spannungsverläufe an ausgewählten Punkten (vgl. Bild 2) der 220-kV-Schaltanlage beim Schließen des Sammelschienentrenners im Schaltfeld 3
a) Leitungstrenner LT geöffnet (Schaltzustand 1),
b) Leitungstrenner LT geschlossen (Schaltzustand 2), Ⓥ Knotenpunkt *v*

Als Störquellen kommen in Frage:
- Schaltvorgänge in Steuerkreisen (Schalten von Induktivitäten)
- Schaltvorgänge mit Hochspannungs-Schaltgeräten (Lichtbogen)
- Blitzeinschläge im Bereich der Schaltanlage.

Da die Spannungsverläufe beim Schalten von Induktivitäten im Labor bestimmt werden können und Blitzüberspannungen für die kapazitive Störeinkopplung infolge ihrer relativ geringen Steilheit nicht den kritischsten Beanspruchungsfall ergeben, wurden die Untersuchungen auf die Bestimmung der Störimpulsspannungen an ausgewählten Steuerkabeln beim Schalten von Trennschaltern konzentriert.

Die 220-kV-Schaltanlage ist mit Doppelsammelschiene und Umgehungsschiene ausgerüstet (Bild 1). Für die Versuche wurde das Schaltfeld 3 (RT1) vorbereitet. Mit Hilfe des Sammelschienentrenners ST 1 konnten zwei unterschiedlich lange Leiterabschnitte zugeschaltet werden. Bei Schaltzustand 1 war der Leistungsschalter LS eingeschaltet und der Leitungstrenner LT geöffnet, so daß nur die etwa 80 m lange Sammelschienenüberspannung zugeschaltet wurde. Bei Schaltzustand 2 waren sowohl der Leitungstrenner LT als auch der Umgehungsschienentrenner UT geschlossen, so daß zusätzlich die Umgehungsschiene des Blockes A bis zur Kupplung durch den Sammelschienentrenner mit zugeschaltet wurde. Diese Schalthandlung ist betriebsmäßig nicht üblich und sollte zur Extremwertabschätzung dienen.

Das Schaltfehlerschutzgerät ist mit Kabeln zur Gleichspannungsversorgung sowie mit Kabeln der Melde- und Steuerkreise von Schaltgeräten verbunden. Infolge der unterschiedlichen Standorte von Wandler und Sammelschienentrenner im Schaltfeld sowie der Batterieanlage in der Schaltwarte haben die entsprechenden Steuerkabel unterschiedliche Länge und Richtung (Bild 2, Steuerkabel durch Strichstärke hervorgehoben). Von jedem Typ wurde ein Stromkreis ausgewählt und ergänzt durch einen Spannungswandlerkreis wurde die Störspannungsbelastung an den Klemmleisten im Steuerschrank (Schnittstellen zur Elektronik) gemessen. Infolge der Trennerschaltungen sind sehr steile Wanderwellenvorgänge auf den Hochspannungsleitern zu erwarten. Diese induzieren in parallel geführten Leitern, also auch in den Kabeladern, etwa gleich steile Spannungsimpulse. Bei vorhandenen Kabelschirmen und/oder parallelen Adern mit beidseitiger induktivitätsarmer Erdung werden diese induzierten Spannungen in den zur Messung ausgewählten Kabeladern reduziert. Der exakte Verlauf der Störspannungen wird von den Reflexionsbedingungen stark beeinflußt.

Bei der Konzeption und bei der Konstruktion der Schaltfehlerschutzgeräte 8 TK wurden bisherige Erfahrungen zur EMV umfassend ausgewertet und verarbeitet. Die Nachweisführung erfolgte durch umfangreiche Prüfungen auf der Grundlage von neuen Prüfnormen, die international und national für die industrielle Prozeßleittechnik empfohlen und auch für den Selektivschutz erfolgreich angewendet werden (Tafel 1).

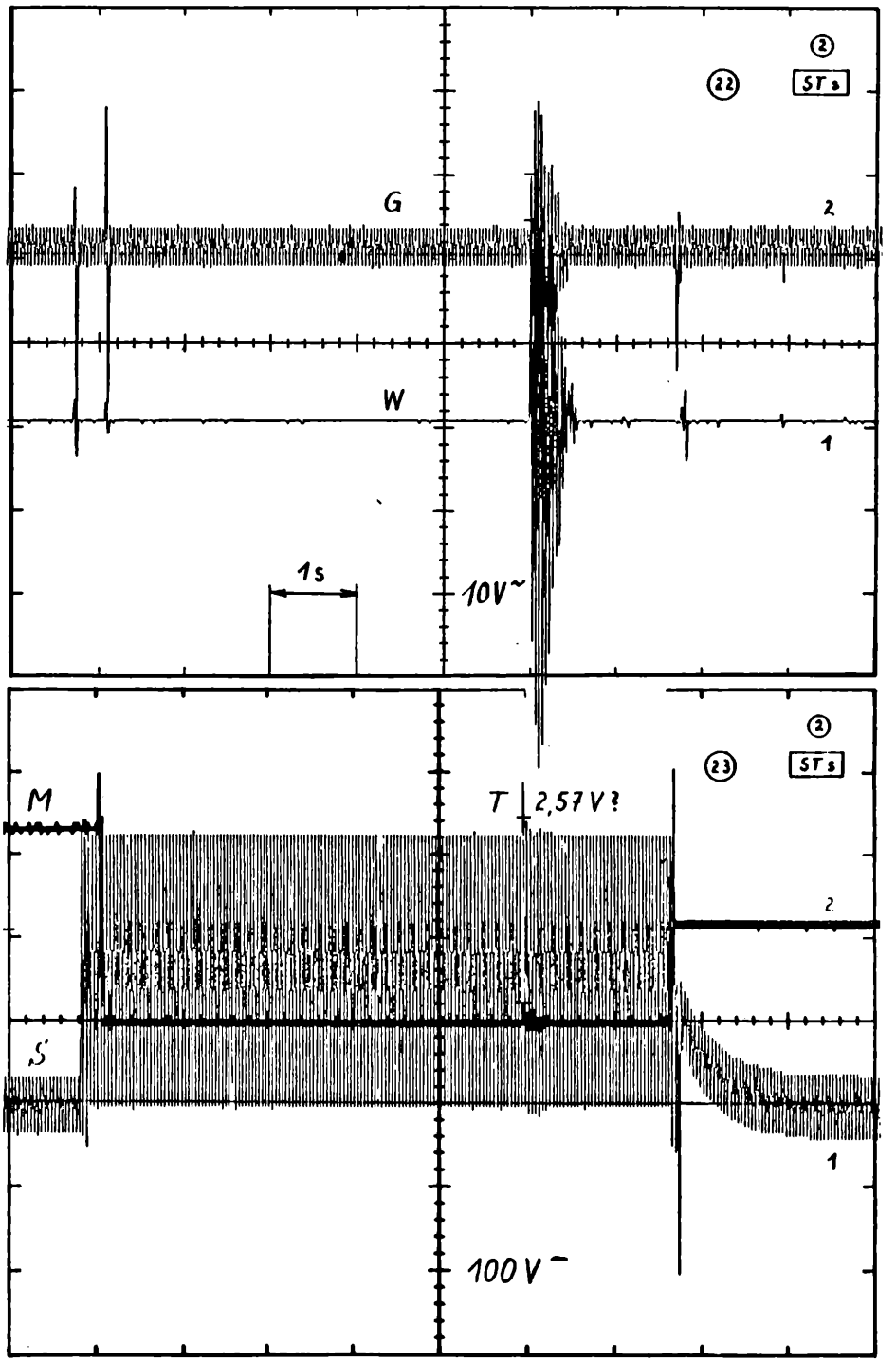



**Bild 5.** Spannungs-Zeit-Verläufe in ausgewählten Steuerkabeln beim Schließen und Öffnen des Sammelschienentrenners, a) Schließen des Trenners (vgl. Bild 5b, S. 466)

## 2. Berechnung der Impulsspannungsverläufe

Näherungsweise kann die Frequenz der Spannungsverläufe an einem Knotenpunkt der Leiteranordnung mit der Länge $l$ und der Wanderwellenausbreitungsgeschwindigkeit $v$ über die Laufzeit $\tau$ der Wanderwellen mit

$$f = \frac{1}{4\tau} = \frac{v}{4l} \qquad (1)$$

bestimmt werden, was bei Schaltzustand 1 eine Laufzeit von etwa 0,3 µs und eine Frequenz von knapp 1 MHz ergibt. Bei Leitungsverzweigungen mit kürzeren Leitungsabschnitten sind Überlagerungen mit höheren Frequenzen zu erwarten. Die dabei zu erwartenden Spannungsverläufe können mit Hilfe von CAD-Systemen [18] genauer berechnet werden.

Hierzu wird die Leiteranordnung der Schaltanlage mit ihren Kapazitäts- und Induktivitätsbelägen durch den Wellenwiderstand $Z_w$ und die Wanderwellenausbrei-

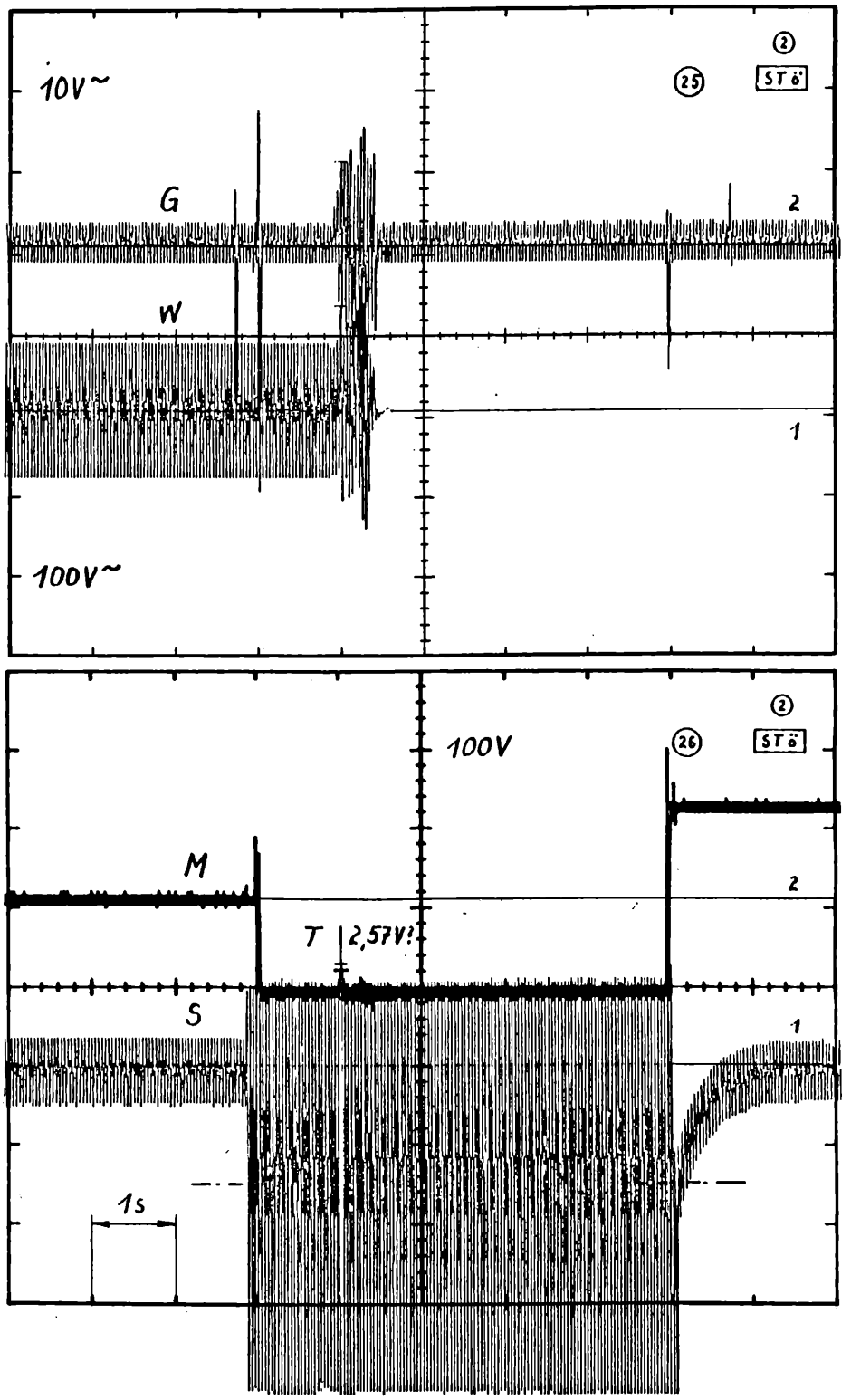



**Bild 5.** b) Öffnen des Trenners, Leitungstrenner LT geschlossen (Schaltzustand 2), Meßort = Freiluft-Steuerschrank (vgl. Titelbild), G Gleichspannungs-Versorgungskabel, M Meldekreis für den Trenner-Schaltzustand, S Steuerkreis für den Sammelschienentrenner, W Spannungswandler-Sekundärkreis (im Bild a Sicherungsautomat ausgeschaltet)

tungsgeschwindigkeit $v$ modelliert (Bild 3). Die Wanderwellenberechnung kann einpolig erfolgen, da die Ergebnisse nur eine Abschätzung der Störspannungen im Kabel liefern sollen.

Der schaltende Sammelschienentrenner ist bezüglich der mechanischen Bewegung des Trennerkontaktes langsam im Vergleich zu den elektrischen 50-Hz-Vorgängen. Demzufolge wird bei genügender Näherung der Trennerkontakte der elektrische Durchschlag stets in der Nähe des Scheitelwertes der Wechselspannung erfolgen. Wird in Kraftwerksnähe die Betriebsspannung in der Größenordnung der oberen Betriebsspannung ($U_h = 245\,\mathrm{kV}$) mit $U_b = 240\,\mathrm{kV}$ angenommen, kann der Trenner in seiner Wirkung durch eine Funkenstrecke mit der Ansprechspannung

$$u_a = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_b \qquad (2)$$

modelliert werden. Dabei ist zu sichern, daß vor dem Ansprechen dieser Funkenstrecke auf der unter Spannung stehenden Sammelschiene der Spannungszustand eingeschwungen ist. Da die Generatorspannung im Wanderwellenprogramm am einfachsten durch eine Keilwelle modelliert wird, ist deren Stirndauer $t_O$ so groß zu wählen, daß Reflexionen an Knotenpunkten und Leitungsenden im wesentlichen abgeklungen sind. Die Länge der abgehenden Leitung (zwischen Knotenpunkten 4 und 5 in Bild 3) wurde so gewählt, daß einerseits dieses Abklingen erreicht werden konnte, aber andererseits Reflexionen am offenen Ende (Knotenpunkt 5) beim Schalten des Trennschalters ST keinen Einfluß auf den für die Messungen interessierenden Bereich haben.

Die Ergebnisse der digitalen Berechnungen (Bild 4) zeigen deutlich die Frequenzunterschiede zwischen den beiden Schaltzuständen. Obwohl für den Vergleich mit den Störspannungsmessungen nur ein Bereich von etwa 10 $\mu$s interessant ist, wurden die Spannungsverläufe darüber hinaus berechnet, um die relativ geringen Unterschiede zwischen den Spannungen an benachbarten Knotenpunkten, verglichen mit dem dominierenden Schwingungsverhalten, deutlich zu machen. Es ist zu erwarten, daß die Störspannungen in den Steuerkabeln unter der Voraussetzung einer linearen Gegenimpedanz ähnlich sind. Die Spannungshöhe ist jedoch von der Länge der Parallelführung, von den Reduktionsfaktoren der Kabelschirmung und von der Dämpfung durch Querglieder an den Kabeladern abhängig. Daraus wurde die Notwendigkeit von Messungen abgeleitet.

## 3. Meßanordnung und Meßergebnisse

Die zu erwartende Steilheit der Impulsstörspannungen erforderte eine hohe Auflösung (Transientenrecorder 2430 A von Tektronix). Zur Vermeidung von Störeinkopplungen in die Meßkabel arbeiten die Aufzeichnungsgeräte in einer geschirmten Meßkabine mit Batterieversorgung. Die Meßkabine ist unmittelbar neben dem Steuerschrank aufgestellt und mittels eines Kupferrohres zur Schirmung der Meßkabel gut leitend mit diesem verbunden (Titelbild). Die zweimal zwei Aufzeichnungskanäle wurden über Koaxialkabel mit den Klemmen des Gleichspannungs-Versorgungskreises, eines Meldekreises, eines Steuerkreises und eines Spannungswandlerkreises verbunden. Da infolge überlagerter 50-Hz-Störspannungen eine Triggerung durch die aufzuzeichnenden Spannungsverläufe nicht zweckmäßig erschien, wurde zur Triggerung eine kurze Drahtantenne (etwa 15 cm aus der Meßkabine heraushängend) verwendet.

Vor Beginn hochauflösender Aufzeichnungen wurde jeweils der gesamte Schaltvorgang des Trenners beim Schließen und Öffnen erfaßt (Bild 5). Da außerdem während der gesamten Prüfdauer der Trennschalter mit Videoaufzeichnungen überwacht wurde, lassen sich in diesen Gesamtauf-

zeichnungen die Zeitpunkte des Schließens und Öffnens der Meldekontakte (Meldekreis M) und das Entstehen des Lichtbogens (Triggermarke T) zeitlich zuordnen und mit der Trennerkontaktbewegung (Bild 6) sowie der Lichtbogenlänge zwischen den Trennerkontakten vergleichen. Insgesamt wurden 8 Schaltvorgänge des Sammelschienentrenners bei Schaltzustand 1 und 6 Schaltvorgänge bei Schaltzustand 2 aufgezeichnet.

Die Meßergebnisse zeigen, daß die Höhe der steilen Störimpulsspannungen in den Kabeladern bei beidseitig geerdeten Kabelschirmen für die kapazitive Störeinkopplung nicht kritisch sind. Der Vergleich der Spannungen bei Schaltzustand 1 (Bild 7a) und Schaltzustand 2 (Bild 7b) läßt erkennen, daß die Laufzeiten der Wanderwellen auf den Sammelschienen und Leiteranordnungen die Frequenz des Spannungsverlaufs bestimmen. Beim Schließen des Trenners konnte eine gute Reproduzierbarkeit der Beeinflussungsbedingungen durch Vergleich der Spannungsverläufe (Bild 7b und c) nachgewiesen werden.

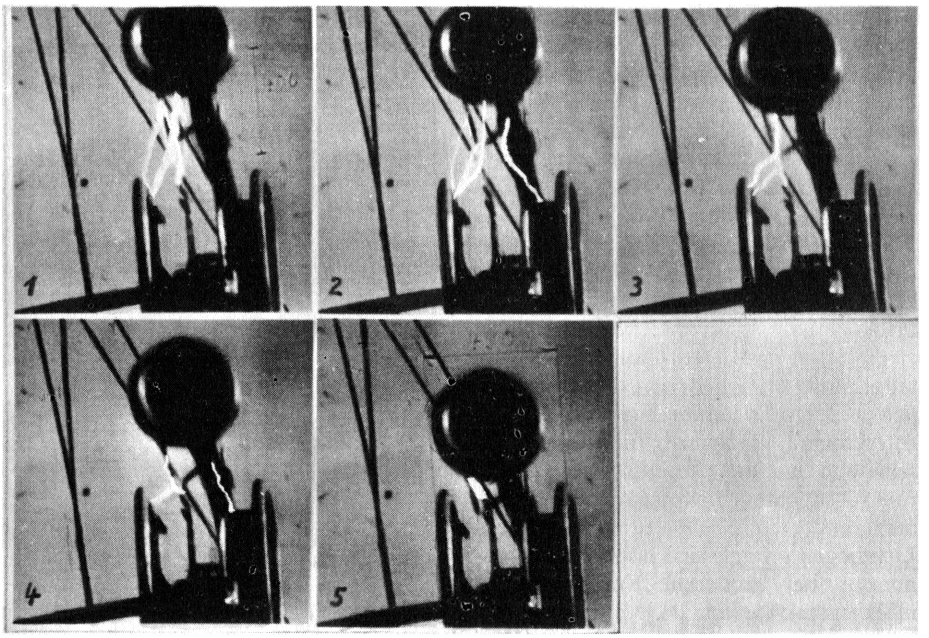


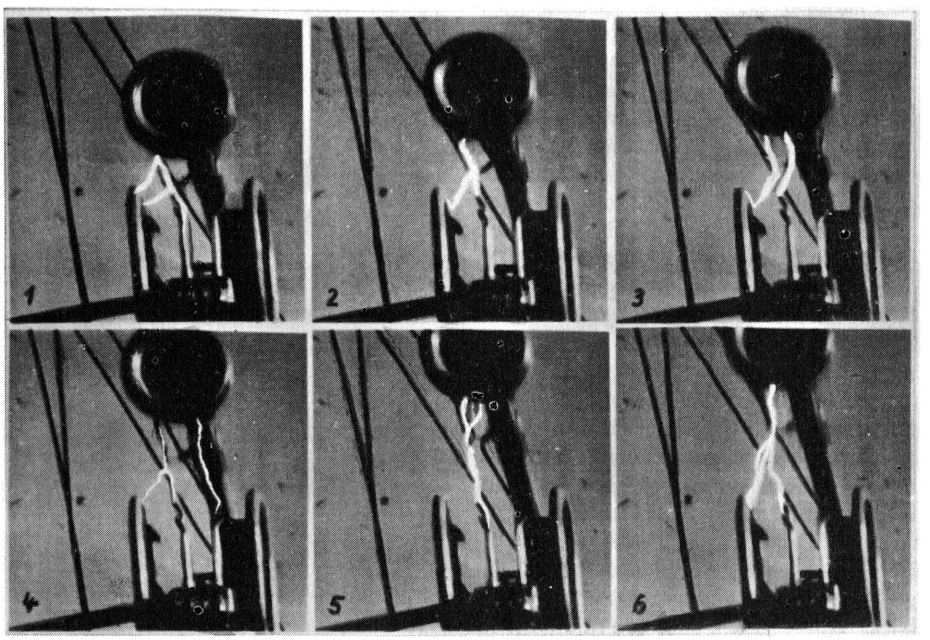

**Bild 6.** Ausgewählte Einzelbilder einer Videoaufzeichnung bei Trennerschaltungen in einer 220-kV-Schaltanlage, a) Schließen des Trenners (1 – erster Lichtbogen, vgl. Bild 4a), b) Öffnen des Trenners (6 – letzter Lichtbogen, vgl. Bild 4b)

## 4. Auswertung und Schlußfolgerungen

Für die Triggerung der Aufzeichnungen kann vorteilhaft die induzierte Spannung einer kurzen Antenne verwendet werden. Infolge der Eingangsbeschaltung des Triggerkreises ergab sich eine integrierende Wirkung, so daß die Triggerspannung mit einer unkritischen zeitlichen Verzögerung von etwa 1,5 $\mu$s nach Lichtbogenbeginn erreicht wurde.

Die überlagerten 50-Hz-Störspannungsanteile wurden durch induktive Einkopplung des Motorstromes der Trennerantriebe verursacht und sind nach Überprüfung der Kabeladerbelegung zu reduzieren.

Die nachgewiesene Reproduzierbarkeit der Spannungsverläufe beim Schließen des Trennschalters bestätigt die Modellbildung über den Beginn des Wanderwellenausgleichsvorganges beim Zünden des Licht-




**Tafel 1.** Neue und zukünftige Prüfnormen für Selektivschutz

| Prüfungstyp | Isolation | | Energieaufnahme | Störfestigkeit leitungsgebunden | | feldgebunden |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Benennung | Wechselspannungsprüfung | Stoßspannungsprüfung | ESD-Test | 1-MHz-Test | Fast Transient Test | Radiated El.-magnetic Field |
| Impulsform | | 1,2/50 $\mu$s | 5/30ns | | 5/50ns | |
| Frequenz | 50 Hz | | | 1 MHz | | (68...87)MHz; (146...174)MHz; (420...470)MHz |
| Wiederholfrequenz | | (1Hz) | 400 Hz | | 2,5 kHz; | |
| Dauer | 1 min | (10s) | | | 15 ms/Burst | |
| Amplitude | 2 kV | 5 kV | 8 kV | 2,5 kV längs; 1,0 kV quer | 2 kV (4 kV)[1] | |
| Feldstärke | | | | | | 3 V/m |
| Energie | | 0,5 J | | | 4 mJ/pulse | |
| Schärfegrad | | Klasse III | 3 | Klasse III | 3 (4) | |
| Quellwiderstand | | (50 Ω); 500 Ω | 150 Ω | 200 Ω | 50 Ω | |
| Vorschriften internat. | | | IEC 801-2; (1984) | | IEC 801-4; (1988) | IEC 801-3; (1984) |
| national DIN VDE ... | 0435 | | 843 T.2; (Sept. 87) | | 0843 T. 4; (Sept. 87) | 0843 T.3; (Febr. 88) |
| ... für Selektivschutz | | IEC 255–4 | IEC 418 (CO) 44; | IEC 255-22; (1988) | IEC 418 (SC) 64; | IEC 418 (CO) 46; |
| international | | –5 | (Nov. 87) | IEC 255 –4; –6 | (Mai 88) | (Nov. 87) |
| | | –6 | | | | |
| national DIN IEC ... | | 0435 T. 303; (Sept. 84) [DIN VDE] | 418 (CO) 44; (März 88) | 0435 T. 303; (Sept. 84) | | 418 (CO) 46; (Juni 88) |

Für Baugruppen und Geräte der Nahsteuerung gilt zusätzlich DIN VDE 0160.

[1] (...) für Stromversorgung

bogens während der Annäherung der Trennerkontakte. Die Hauptfrequenzanteile der gemessenen Störspannung werden von den Reflexionsbedingungen und somit von den Längen der Sammelschienen- und Leiterabschnitte bestimmt. Für luftisolierte Hochspannungsanlagen liegt die Frontdauer der Einzelimpulse kaum unter 100 ns, so daß die tatsächlichen Beanspruchungen infolge kapazitiver Störeinkopplung deutlich geringer als bei den in den Prüfnormen empfohlenen Einzelimpulsen zu erwarten sind. Demzufolge ist bei metallgekapselten Schaltanlagen mit wesentlich steileren Spannungsbeanspruchungen zu rechnen [19]. Beim Öffnen des Trennschalters sind die Spannungsverläufe infolge des Lichtbogeneinflusses nicht reproduzierbar. Da die Triggerung beim ersten Lichtbogen erfolgt, sind höhere Störspannungen bei größerem Kontaktabstand nicht auszuschließen.

Bedingt durch die induktivitätsarme Erdung der Kabelschirme wurden Impulsstörspannungen an den Kabeladern mit relativ geringen Amplituden von etwa 20 bis 50 V gemessen. Wesentlichen Einfluß auf diese Höhe haben neben der Schirmwirkung der Kabelmäntel auch die Längen der Parallelführung von Steuerkabeln zu den Hochspannungs-Leiteranordnungen. Die bei diesem Einsatzfall praktisch auftretenden kapazitiv eingekoppelten Störspannungsimpulse sind geringer als die bei den Prüfungen verwendeten. Die ausgeprägten Schwingungen in den Störspannungsverläufen werden durch Prüfungen mit Burstimpulsen als Worst-case-test gut approximiert (Tafel 1).

Zusammenfassend wird eingeschätzt, daß durch Wanderwellenberechnungen die Frequenz von Störspannungsbelastungen in Steuerkabeln mit ausreichender Genauigkeit abgeschätzt werden kann. Demzufolge sind diese Programmsysteme auch für Berechnungen im Rahmen der EMV gut geeignet. Bei sorgfältiger Erdung der Kabelschirme ergeben sich in Freiluftschaltanlagen unkritische Störbelastungen für die kapazitive Störeinkopplung, bei denen die elektromagnetische Verträglichkeit der elektronischen Geräte über Prüfungen nachgewiesen werden konnte. Somit haben der ESD-Test und der Burst-Test für diesen Einsatzfall die größte Bedeutung für den Nachweis der EMV. Die Aufteilung der Adern von Steuerkabeln ist so vorzunehmen, daß Hin- und Rückleiter grundsätzlich im gleichen Kabel zu führen sind.

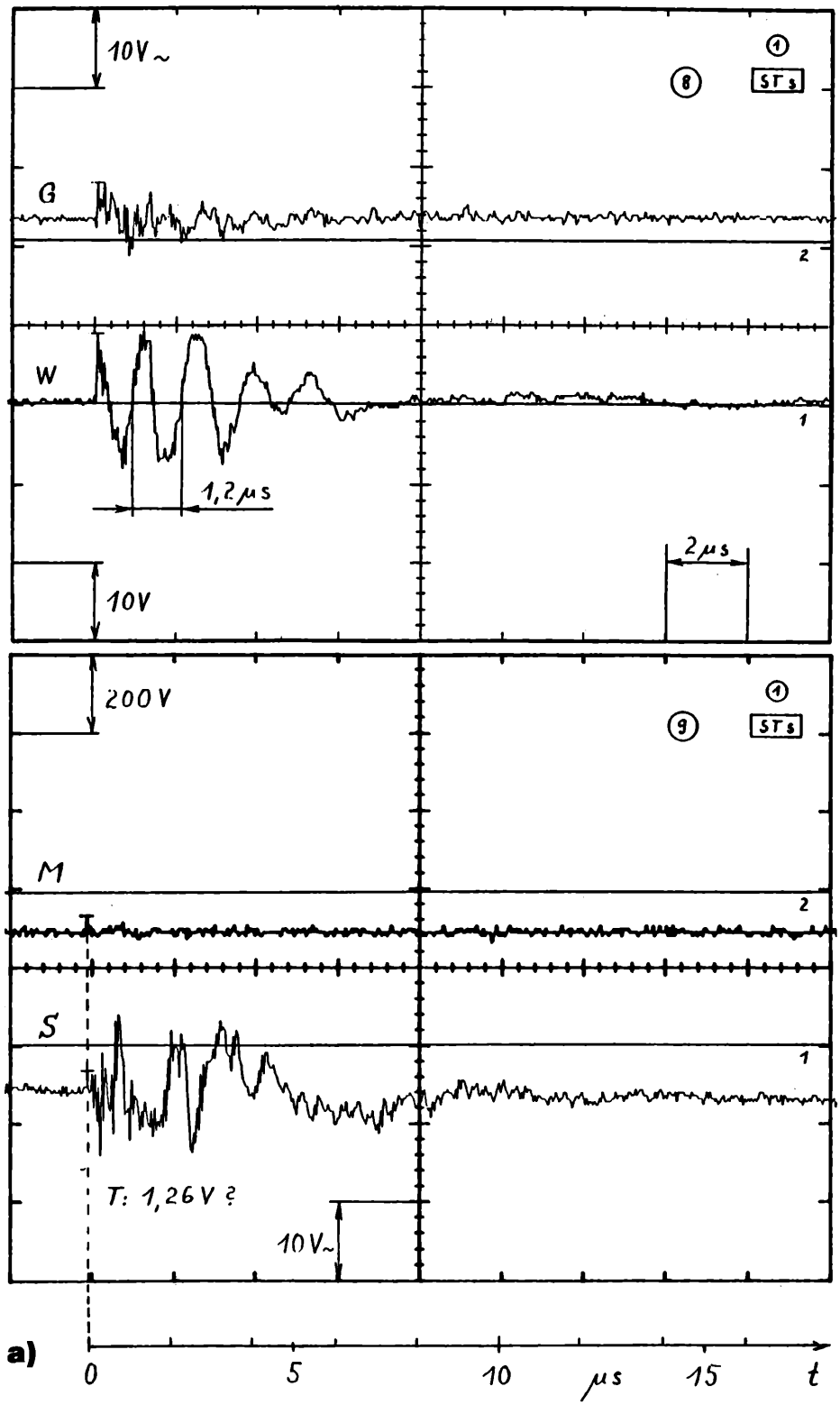



**Bild 7.** Störspannungsverläufe an den Klemmstellen von ausgewählten Steuerkabeln im Steuerschrank beim Schließen des Sammelschienentrenners ST, a) Leitungstrenner LT geöffnet (Schaltzustand 1), b) Leitungstrenner LT geschlossen (Schaltzustand 2), c) wie b) zum Vergleich der Reproduzierbarkeit, G Gleichspannungs-Versorgungskabel, M Meldekreis für den Trenner-Schaltzustand, S Steuerkreis für den Sammelschienentrenner, W Spannungswandler-Sekundärkreis (vgl. Bilder 7b und 7c, S. 469)

**Literatur**


[1] *Ambrosch, H.*: Rekonstruktion von 220- und 380-kV-Schaltanlagen in Tandembauweise, ein Beitrag zu Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. *ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S.443

[2] *Bauer, H.; Berthold, St.*: Schaltgeräteorientierte und pfadorientierte Schaltfehlerschutzsysteme für Hochspannungs-Schaltanlagen. *ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S.450–455

[3] *Bäsel, G.*; u. a.: Neuer Schaltfehlerschutz in der 220-kV-Schaltanlage Lubmin. *ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S.456–462

[4] *Andrä, W.; Feist, K.-H.*: Vermeidung unzulässiger elektromagnetischer Beeinflussung bei Netzleitsystemen. etz 104 (1983) 7/8, S. 347–350

[5] *Kohling, A.*; u. a.: Planung der elektromagnetischen Verträglichkeit von Systemen. etz 106 (1985) 9, S. 424–426

[6] *Kahnt, R.*: Verträglichkeit im Netz. Elektrotechnik Bd.69 (1987) 9, S. 17–26

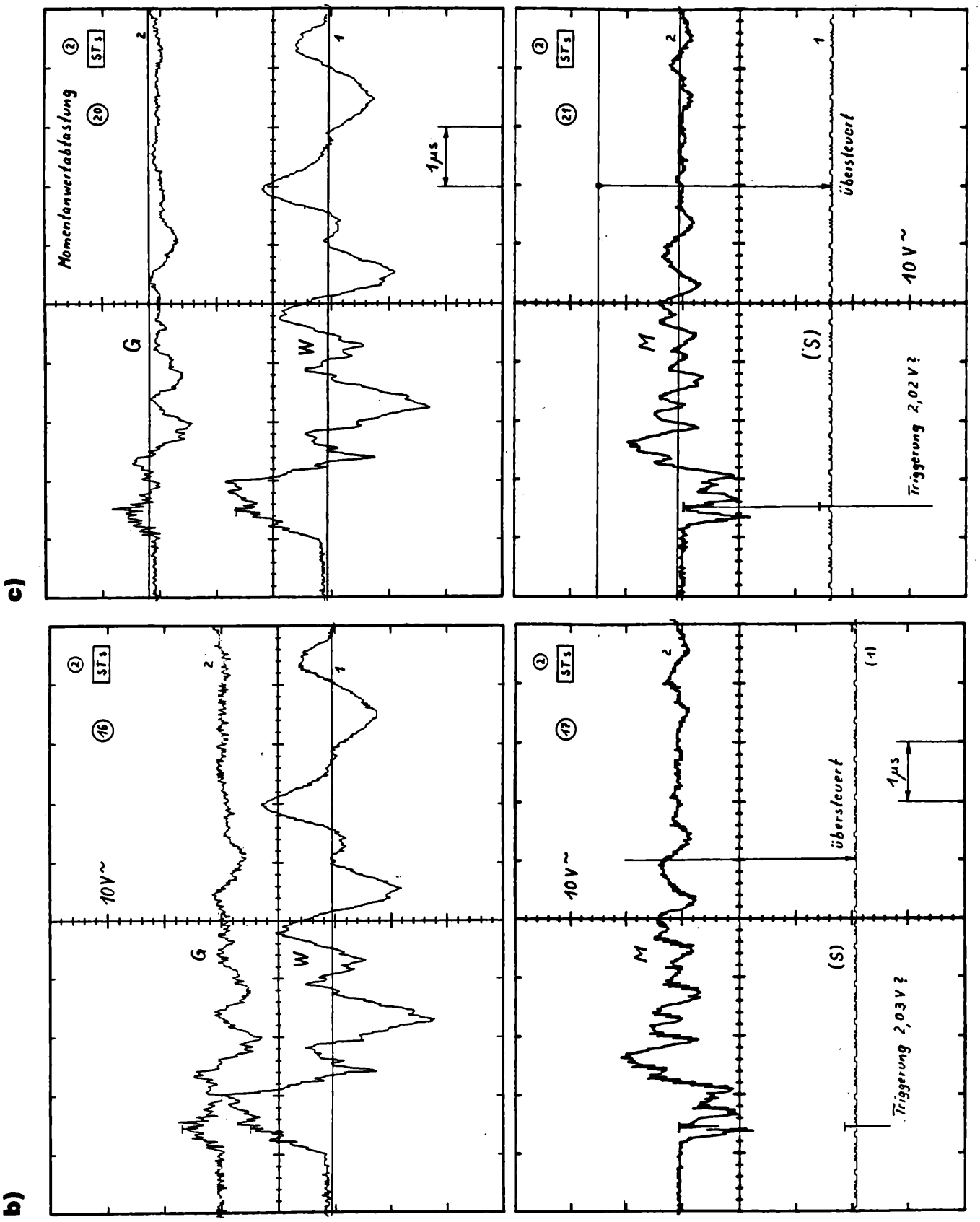
[7] *Bauer, H.; Langer, G.*: Erhöhung der Zuverlässigkeit einer modernen Prozeßleittechnik für Umspannwerke durch Maßnahmen zur elektromagnetischen Verträglichkeit. Wiss. Zeitschrift der TU Dresden 36 (1987) 3, S. 175–181

[8] *Bauer, H.; Langer, G.*: Elektromagnetische Verträglichkeit durch Fehlererkennungs- und Fehlertoleranzprinzipien. *ELEKTRIE*, Berlin 42 (1988) 1, S. 28–31

[9] *Bauer, H.: Langer, G.*: Störfestigkeit der Eingangskreise für Meldungen bei unterschiedlichen Nennspannungen. *ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 8, S. 292–297

[10] Elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln der industriellen Prozeßautomatisierung. Allgemeine Einführung. DIN VDE 0843, Teil 1 (IEC 801-1)

[11] Elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln der industriellen Prozeßautomatisierung. Störfestigkeit gegen die Entladung statischer Elektrizität; Anforderungen und Meßverfahren. DIN VDE 0843, Teil 2 (IEC 801-2)





[12] Elektromagnetische Verträglichkeit von Meß-, Steuer- und Regeleinrichtungen in der industriellen Prozeßtechnik; Störfestigkeit gegen elektromagnetische Felder. Anforderungen. DIN VDE 0843, Teil 3 (IEC 801-3)

[13] Störfestigkeit gegen transiente Überspannungen mit hohen Frequenzanteilen im Nanosekundenbereich („Burst"); Anforderungen und Meßverfahren. DIN VDE 0843, Teil 4 (IEC 801-4)

[14] Störfestigkeit gegen Überspannungen im Mikrosekundenbereich, Anforderungen und Meßverfahren. DIN VDE 0843, Teil 5 (IEC 801-5)

[15] *Bauer, H.; Langer, G.*: Modelle und Strategien für Prüfungen der elektromagnetischen Verträglichkeit. *ELEKTRIE*, Berlin 42 (1988) 11, S. 409–415

[16] *Bauer, H.; Drescher, G.; Diessner, A.; Schwirkslies, W.*: Auswertung von Störbeeinflussungsmessungen an Steuerkabeln bei Trennerschaltungen in der 220-kV-Schaltanlage Lubmin am 22.5.1990. Bericht 811/1990 des Instituts für Elektroenergieversorgung der TU Dresden

[17] *Bauer, H.; Mahnert, H.*: Besonderheiten in Umspannwerken mit mikroelektronischer Sekundärtechnik. Abschnitt 18 im VEM-Handbuch Elektromagnetische Verträglichkeit. Verlag Technik Berlin, 1. Auflage (1987)

[18] *Koettnitz, H.; Bauer, H.; Drescher, G.*: Die Bestimmung des Blitzüberspannungsschutzes von $SF_6$-isolierten 123-kV-Schaltanlagen beliebiger Zusammenstellung. IET, Leipzig 12 (1982) 3, S. 193–206 und 4, S. 319–333

[19] *Gurablenkow, J.; Luxa, G. F.*: Measurements and Improved Modelling of Disconnect Switching in Gas Insulated Substations. Sixth International Symposium on high voltage engineering, New Orleans (1989), p. 32.21


EA 6226

# Elektrische Belastung der Schaltstreckenisolierung von Hochspannungs-Leistungsschaltern im ausgeschalteten Zustand

**H. Ambrosch, Dresden; M. Ebner, Radebeul**

Hochspannungs-Leistungsschalter müssen in bezug auf Zuverlässigkeit höchsten Anforderungen gerecht werden. Für die Schaltstreckenisolierung bedeutet dies beim Ausschaltvorgang die zuverlässige Wiederherstellung des Isoliervermögens nach der Lichtbogenunterbrechung im oder in der Nähe des natürlichen Stromnulldurchganges (Entionisierung) und im ausgeschalteten Zustand die zuverlässige Sicherung des Isoliervermögens gegenüber den am jeweiligen Einsatzort auftretenden Spannungsbelastungen. Für beide Aufgabenstellungen sind im Bild 1 Beispiele für die Spannungsbelastung angegeben.

Das theoretische Wissen um die Vorgänge während und unmittelbar nach der Lichtbogenlöschung in Hochspannungsleistungsschaltern sowie die umfangreichen Erfahrungen aus dem Netzbetrieb und aus den Hochleistungsprüffeldern haben dazu geführt, daß bei mechanisch ordnungsgemäßer Funktion Störungen in Zusammenhang mit der Lichtbogenlöschung außerordentlich selten geworden sind.

In den letzten Jahren sind dagegen in einigen Fällen Durch- oder Überschläge an Schaltstreckenisolierungen aufgetreten, die nicht unmittelbar mit der Physik des Löschvorganges im Zusammenhang standen, aber zum Teil kurz vor dem Einschalten beim Synchronisieren oder kurz nach dem Ausschalten von Last- oder Kurzschlußströmen aufgetreten sind. Der Schaden kann in beiden Fällen, insbesondere für die zu schaltenden Betriebsmittel und für das Elektronenergiesystem, erheblich sein. In den meisten der beobachteten Fälle traten die genannten Störungen in Schaltanlagen bei extremen Fremdschichtbelastungen auf. Im nachfolgenden Text wird die Schaltstreckenbelastung im ausgeschalteten Zustand durch betriebsfrequente Spannungen analysiert. Es werden Überlegungen für die Festlegung der Nennstehwechselspannung, auch unter Berücksichtigung einer Fremdschichtreserve, abgeleitet.

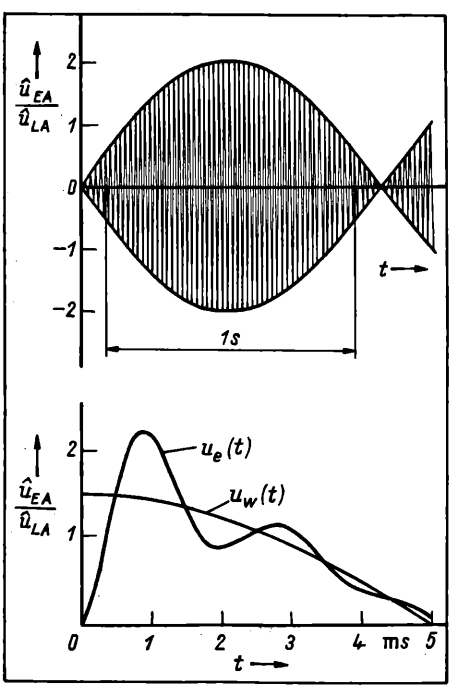



**Bild 1.** Spannungsbelastung der Schaltstrecke eines Leistungsschalters
b) Synchronisieren

a) Ausschalten eines Kurzschlußstromes

## 1. Erdisolierung und Schaltstreckenisolierung bei Trenn- und Leistungsschaltern

### 1.1. Grundsätzlicher Aufbau

Den prinzipiellen Aufbau der Erd- und Schaltstreckenisolierung für Trenn- und Leistungsschalter in offenen Anlagen zeigt Bild 2. Wesentliche Kennzeichen sind die Trennstrecke als Luftdurchschlagstrecke und die Anordnung von parallelen Isolierungen (z. B. Stützer und Antriebsisolator an Trennschaltern, Schaltkammer und Steuerkondensator an Leistungsschaltern). Bei Leistungsschaltern kommt hinzu, daß es neben der äußeren stets auch innere Isolierstrecken gibt und daß die Isolatoren konstruktiv sowohl vertikal als auch kombiniert, vertikal (Erdisolierung) und horizontal (Schaltstreckenisolierung), angeordnet sein können.

### 1.2. Erdisolierung

Die elektrische Belastung der Erdisolierung von Trenn- und Leistungsschaltern unterscheidet sich nicht von der Belastung der Erdisolierung der gesamten Strombahn. Die Nennstehwechselspannung wird nach Gl. (1) bestimmt und ist in den nationalen und internationalen Standards [1] [2] festgelegt (Tabelle 1, Spalte 4).

$$U_{n\,stw}^{LE} = c_w^{LE}\, c_f\, c_d\, \frac{U_h}{\sqrt{3}} \tag{1}$$

$c_w^{LE}$ Wechselspannungssicherheitsfaktor
$c_f$ Erdfehlerfaktor
$c_d$ dynamischer Spannungsüberhöhungsfaktor
$U_h$ Isolationsspannung

### 1.3. Schaltstreckenisolierung

Die Nennstehwechselspannung für die Schaltstrecken von Trenn- und Leistungsschaltern im ausgeschalteten Zustand kann unter der Annahme asynchroner Spannungen sowie betriebsfrequenter Spannungsüberhöhungen auf beiden Seiten (Extremfall) allgemein nach Gleichung (2) berechnet werden.

$$U_{n\,stw}^{EA} = c_w^{EA}\,(c_{f1}\, c_{d1} + c_{f2}\, c_{d2})\, \frac{U_h}{\sqrt{3}} \tag{2}$$

Unterschiedlich für Trenn- und Leistungsschalter und unter Berücksichtigung der Koordinationsform, Isolationsklasse (Begriffe nach [1]) und den daraus abgeleiteten Wechselspannungssicherheitsfaktoren ergeben sich je nach Gerät und Einsatzort im Netz unterschiedliche Nennstehwechselspannungen.

Die Nennstehwechselspannung für Trennstrecken wird unter Annahme eines Erdfehlers und einer dynamischen Spannungsüberhöhung auf der einen Seite des Trenners und einer dazu asynchronen Spannung ohne Erdfehler, aber ebenfalls unter Berücksichtigung einer dynamischen Spannungsüberhöhung, auf der anderen Seite des Trenners nach Gl. (3) berechnet und ist in den bereits genannten Standards festgelegt (Tabelle 1, Spalte 8)

$$U_{n\,stw}^{Tr} = c_w^{Tr}\,(1 + c_f)\, c_d\, \frac{U_h}{\sqrt{3}}. \tag{3}$$

Die Nennstehwechselspannung für Schaltstrecken von Leistungsschaltern muß abhängig vom Einbauort im Elektroenergiesystem bestimmt werden (ähnlich wie z. B. bei der Auswahl der Überspannungsableiter). Es sollte dabei zwischen zwei Kategorien unterschieden werden:

Prof. Dr. sc. techn. *Helmut Ambrosch* ist ordentlicher Professor, und Dipl.-Ing. *Michael Ebner* ist wissenschaftlicher Assistent an der Technischen Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik

**Tafel 1.** Ableitung der Nennstehwechselspannung für die Schaltstreckenisolierung von Leistungsschaltern der Kategorien 1 und 2 aus der elektrischen Belastung im Netzbetrieb

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_h$ | *KF* | *IK* | $U_{nstw}^{LE}$ | $C_d$ | $c_f$ | $C_w^{LE}$ | $U_{nstN}^{Tr}$ | $C_w^{Tr}$ | $C_w^{EAI}$ | $U_{nstw}^{EAI}$ |
| kV | | | kV | | | | | | | |
| **12** | 2 | N | **28** | 1 | $\sqrt{3}$ | 2,33 | **32** | 1,69 | 1,69 | **32** |
| **24** | 2 | N | **50** | 1 | $\sqrt{3}$ | 2,08 | **60** | 1,58 | 1,58 | **60** |
| **36** | 2 | N | **70** | 1 | $\sqrt{3}$ | 1,94 | **80** | 1,41 | 1,41 | **80** |
| **123** | 2 | N | **230** | 1,05 | $\sqrt{3}$ | 1,78 | **265** | 1,37 | 345 | |
| **245** | 2 | NE | **395** | 1,35 | 1,2 | 1,72 | **460** | 1,36 | 1,72 | **570** |
| **420** | 3 | NE | **520** | 1,35 | 1,2 | 1,32 | **610** | 1,07 | 1,32 | **750** |

$$U_{nstw}^{LE} = C_w^{LE}\, c_d\, c_f \frac{U_h}{\sqrt{3}};\quad U_{nstw}^{Tr} = C_w^{Tr}\,(1+c_f)\, c_d \frac{U_h}{\sqrt{3}};\quad U_{nstw}^{EA1} = C_w^{EA1}\,(1+c_{d,fmax}) \frac{U_h}{\sqrt{3}}$$

*Kategorie 1*
Leistungsschalter, über denen asynchrone Spannungen anstehen können, d. h. alle Generatorleistungsschalter, Generatornetzschalter, Netzkuppelschalter einschließlich all der Schalter, die durch einen Schalterversagerschutz mit derartigen Spannungen belastet werden können. Dies betrifft auch eine relativ große Gruppe von Mittelspannungsleistungsschaltern im Eigenbedarf von Kraftwerken mit Reserve- oder Noteinspeisung aus evtl. asynchronen Fremdnetzen oder Dieselnotstromaggregaten.

*Kategorie 2*
Leistungsschalter, die passive Lasten schalten (Netze oder Netzteile ohne Eigenerzeugung) oder Leistungsschalter innerhalb eines Netzverbandes, bei denen stets von der Existenz paralleler Stromwege ausgegangen werden kann ($\Delta f = 0$).
Die gültigen Standards ordnen die Nennstehwechselspannung der Schaltstrecken für Leistungsschalter folgendermaßen zu: Bis zu einer Nennspannung von 245 kV der Isolationsgruppe 2, identisch mit den Werten für die Erdisolierung nach Gl. (1), und ab einer Nennspannung von 420 kV der Isolationsgruppe 1, identisch mit den Werten für die Trennstreckenisolierung nach Gl. (3). Die Einteilung nach Kategorie 1 und 2 ist aber – wie gezeigt – nicht zwangsläufig von der Nennspannung der Schaltgeräte abhängig.
Für die Bemessung der Schaltstreckenisolierung für Leistungsschalter der Kategorie 1 ist eine sorgfältige Bestimmung der einzelnen Faktoren in Gl. (2) und eine Analyse der zu berücksichtigenden Beanspruchungen bzw. Beanspruchungskombinationen erforderlich. Es ist nicht zulässig, generell Maximalwerte für alle Einflußfaktoren und die Annahme ihrer gleichzeitigen Wirkung, also extrem kritische Bedingungen, als Grundlage für die Bemessung der Isolierung zu verwenden. Gerade dazu gibt es in der Literatur und auch in der aktuellen Diskussion sehr unterschiedliche Auffassungen und Ansätze [3] bis [7] und [13].

## 2. Vergleich der Faktoren für die zeitweiligen Spannungsüberhöhungen nach Standard und im praktischen Netzbetrieb

### 2.1. Erdfehlerfaktor

Der Erdfehlerfaktor wird von der Art der Netzsternpunkterdung und dem Fehlerort bestimmt.

$$c_f = \frac{U_{LEmax}}{U_b/\sqrt{3}} \tag{4}$$

$U_{LEmax}$ Spannung der gesunden Leitung bei Erdfehler im dritten Leiter
$U_b/\sqrt{3}$ Leiter-Erde-Spannung im Normalbetrieb.
Bei Resonanzsternpunkterdung und in Netzen ohne Sternpunkterdung (z. B. Hochstromverbindung zwischen Generator und Blocktransformator und ältere Kraftwerkseigenbedarfsanlagen), können Erdfehlerfaktoren von $c_f \leqq \sqrt{3}$ auftreten. Für derartige Net-

**Tafel 2.** Nennstehwechselspannungen für Schaltstrecken von 245 kV-Leistungsschaltern der Kategorie 1

| Quelle | $c_{d1}$ | $c_{f1}$ | $c_{d2}$ | $c_{f2}$ | $C_w^{EA1}$ | $U_{nstw}^{EA1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Böhm* [5] | 1 | 1 | 1 | 1 | $1{,}39 \cdot \frac{2}{1{,}4}$ | **560 kV** |
| *Pfeiffer* [6] | 1,15 | 1 | 1,25 | 1,73 | 1,15 | **530 kV** |
| *Grabner* [7] | 1,25 | 1,5 | 1,15 | 1 | 1,3 | **560 kV** |
| Autoren | 1 | 1 | 1,35 | 1 | 1,72 | **570 kV** |

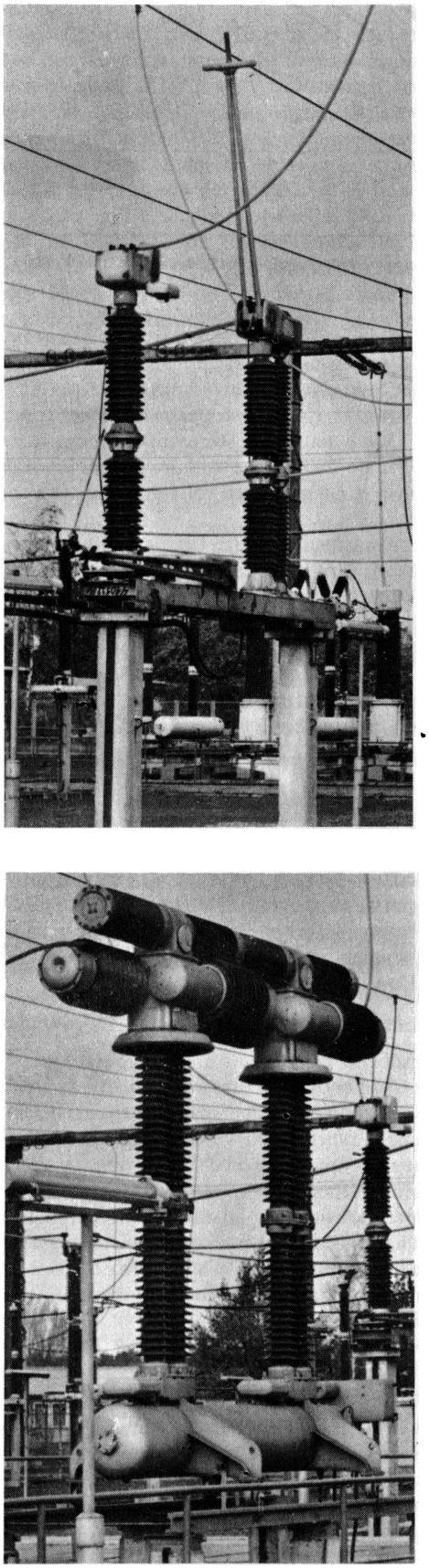


**Bild 2.** 245-kV-Trenn- und Leistungsschalter Aufbau der äußeren Isolierungen

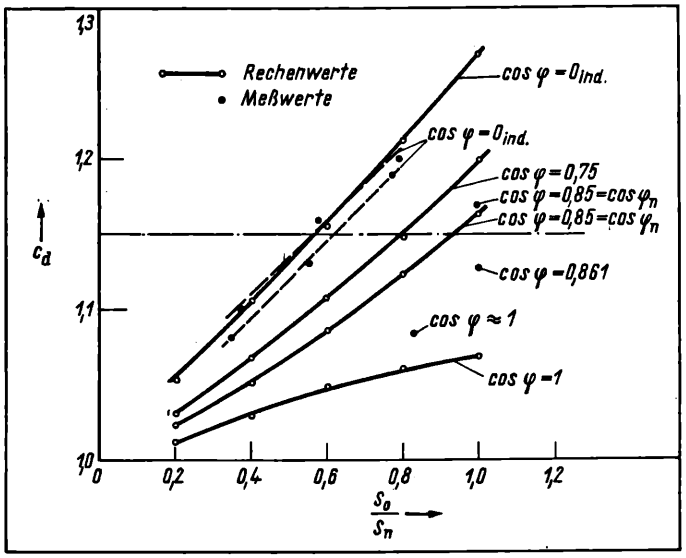



**Bild 3.** Dynamischer Spannungsüberhöhungsfaktor bei Lastabwurf (210-MW-Block, Generatorseite)

ze (Isolationsklasse N) ist ein Erdfehlerfaktor von $c_f = \sqrt{3}$ für eine maximale Dauer von 2 Stunden zu berücksichtigen.
In Netzen mit wirksamer Sternpunkterdung (Isolationsklasse NE) ist ein Erdfehlerfaktor von $c_f = 1{,}4$ für eine maximale Dauer von 1 Sekunde einzuhalten. Durch teilstarre Sternpunkterdung, d. h. nur ein Teil der Transformatoren im Netz wird direkt geerdet, soll der Erdfehlerfaktor von $c_f = 1{,}4$ möglichst voll ausgeschöpft werden.
Da die Sternpunkte der Transformatoren in Großkraftwerken generell starr geerdet werden, wird in deren Nähe der Wert $c_f = 1{,}4$ nicht erreicht. Um Angaben über die tatsächlich auftretenden Erdfehlerfaktoren zu bekommen, wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energetik, Leipzig, Berechnungen einpoliger Erdfehler in ausgewählten Knotenpunkten des 380/220-kV-Netzes der DDR durchgeführt und ausgewertet [8]. Folgende Grenzwerte wurden in den Kraftwerken bzw. Kraftwerksschaltanlagen ermittelt:

| *220-kV-Anlagen* | *380-kV-Anlagen* |
|---|---|
| $c_f = 1{,}02$ bis 1,182 | $c_f = 1{,}052$ bis 1,189. |

Demzufolge ist für die Bemessung der Isolierung in Kraftwerksnähe die Berücksichtigung eines Erdfehlerfaktors von $c_f = 1{,}2$ ausreichend, für alle anderen 380/220-kV-Netzknotenpunkte muß von $c_f = 1{,}4$ ausgegangen werden. Für die Netze mit freiem Sternpunkt und Netze mit Resonanzsternpunkterdung muß, da hierfür keine detaillierten Messungen oder Berechnungen vorliegen, mit $c_f = \sqrt{3}$ gerechnet werden.

### 2.2. Dynamischer Spannungsüberhöhungsfaktor

Dynamische Spannungsüberhöhungen sind u. a. Folge einer plötzlichen Entlastung eines Netzknotenpunktes von einer Wirk- und/oder Blindleistung. Transienten Schaltüberspannungen, die direkt durch die Stromänderung hervorgerufen werden, folgt ein Ansteigen der betriebsfrequenten Spannung über ihren oberen Wert (Isolationsspannung) am gleichen oder an anderen Netzpunkten. Diese betriebsfrequenten zeitweiligen Spannungsüberhöhungen sind bedingt durch den neuen Schaltzustand und den Überregeleffekt und können bis zu mehreren Sekunden andauern. Zur Kennzeichnung der dynamischen Spannungsüberhöhung dient der dynamische Spannungsüberhöhungsfaktor $c_d$.

$$c_d = \frac{U_{üzd-LE}}{U_b/\sqrt{3}}$$

$U_{üzd-LE}$ durch Lastabwurf erhöhte Leiter-Erde-Spannung
$U_b/\sqrt{3}$ Leiter-Erde-Spannung unmittelbar vor dem Lastabwurf am gleichen Meßpunkt

Einflußfaktoren bei Lastabwurf sind u. a. der stationäre Ausgangszustand $(P, Q)$, die Generatornennleistung, und die Restbelastung nach Lastabwurf, z. B. durch den Kraftwerkseigenbedarf [8]. Im derzeit gültigen Standard wird einheitlich, auch in Kraftwerksnähe, von einem dynamischen Spannungsüberhöhungsfaktor von $c_d \leqq 1{,}15$ ausgegangen [1]. Es gibt jedoch in der Literatur an mehreren Stellen Aussagen, daß dieser Wert in Kraftwerksnähe z. T. erheblich überschritten werden kann.
Deshalb wurden in [8] Lastabwurfsoszillogramme der Inbetriebnahmeversuche von großen Kraftwerksblöcken in der DDR ausgewertet. Ergänzend dazu wurde für eine einfache Netzanschaltung eines 210-MW-Kraftwerksblockes der Verlauf der Generator- und der Knotenpunktspannung auf der Oberspannungsseite des Blocktransformators für verschiedene Lastabschaltungen mit dem PC-Programm NEDYN berechnet.
Einen Vergleich zwischen den gewonnenen Meß- und Rechenwerten zeigen die Bilder 3 und 4. Während die Werte bei $\cos \varphi = 0$ wohl nur von theoretischem Interesse sind, weisen die Ergebnisse aus, daß selbst bei $\cos \varphi = 0{,}85$ (Nennwert) der im Standard vorgegebene Wert $c_d \leqq 1{,}15$ nicht eingehalten werden kann. Für die 210 MW-, 220 MW- und 500 MW-Blöcke muß mit Werten $c_{d\,max} = 1{,}2$ auf der Generatorseite und mit $c_{d\,max} = 1{,}35$ auf der Oberspannungsseite des Blocktransformators gerechnet werden.

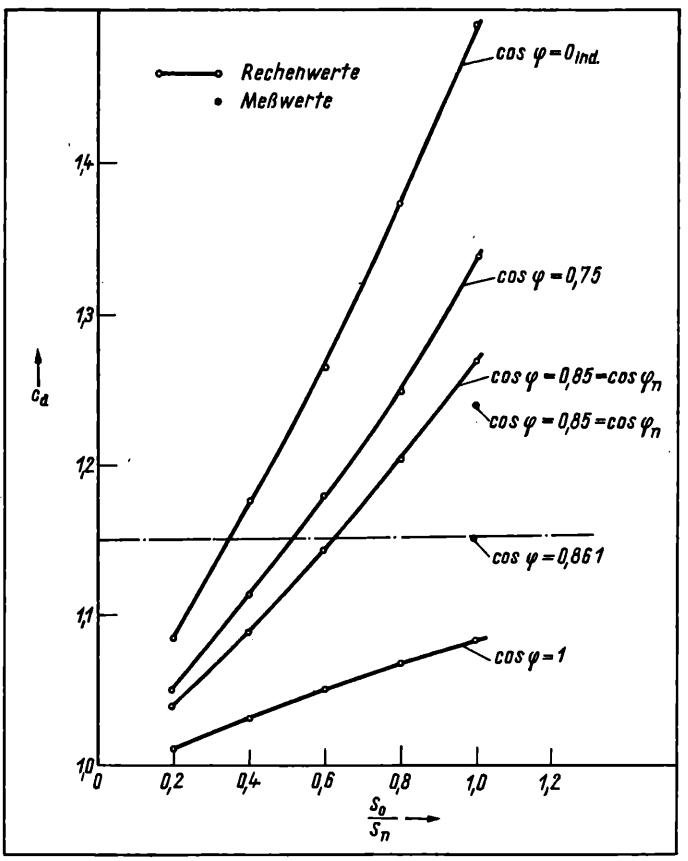



**Bild 4.** Dynamischer Spannungsüberhöhungsfaktor bei Lastabwurf (210-MW-Block, Oberspannungsseite des Blocktransformators); $S_o$ – abgeschaltete Leistung, $S_n$ – Generatornennleistung

## 3. Überlegungen für die Festlegung der Nennstehwechselspannung von Schaltstreckenisolierungen im sauberen Zustand

### 3.1. Leistungsschalter der Kategorie 2

Geht man davon aus, daß sich die Bemessung der Leiter-Erde-Isolierung nach Tabelle 4, Spalte 1 bewährt hat, liegt es nahe, für die Schaltstrecken der Leistungsschalter der Kategorie 2 – und damit der Mehrzahl aller Leistungsschalter – von den gleichen Werten wie für die Erdisolierung auszugehen. Sollte gegenüber der Erdisolierung ein erhöhtes Maß an Zuverlässigkeit gefordert werden, kann dies durch Erhöhung des Wechselspannungssicherheitsfaktors erreicht werden.

### 3.2. Leistungsschalter der Kategorie 1

Für die Bemessung der Schaltstreckenisolierung von Leistungsschaltern der Kategorie 1, d. h. der Leistungsschalter, an denen

asynchrone Spannungen anstehen können, ist es zunächst erforderlich, die Annahmen bei der Festlegung der Leiter-Erde-Isolierungen nach Gl. (1) und der Trennstreckenisolierung nach Gl. (3) zu analysieren.

Das ist nicht ganz einfach, weil die Prüfspannungen zunächst nur nach praktischen Erfahrungen in der Größenordnung von 2...3fache Nennspannung festgelegt wurden. Für Luftstrecken, die keinem Alterungsprozeß unterworfen sind, z. B. für Trennstrecken, wurden dabei in bezug auf die mögliche elektrische Belastung kleinere Werte festgelegt als für Isolierungen mit Grenzflächen, die einer Alterung unterliegen. Für kleinere Nennspannungen wurde ein größeres Verhältnis von Prüfspannung/Nennspannung festgelegt, weil der Mehraufwand für höhere elektrische Festigkeit verhältnismäßig geringer ist als bei höheren Nennspannungen [9].

Das Ergebnis der „Rückrechnungen" nach Gl. (1) und Gl. (3) ist in Form der Wechselspannungssicherheitsfaktoren für die Leiter-Erde- und für die Trennstreckenisolierung in der Tafel 1 in den Spalten 7 und 9 ausgewiesen. Die angenommenen Werte für $c_d$ und $c_f$ (Spalte 5 und 6 der gleichen Tafel) wurden für die Nennspannungen 12 bis 123 kV dem Standard VDE 0111 [10] entnommen, für die Nennspannungen 245- und 420 kV entsprechen sie dem Ergebnis der eigenen Untersuchungen (siehe Pkt. 2).

Die so ermittelten Wechselspannungssicherheitsfaktoren in ihrer Relation zueinander scheinen im obengenannten Sinne sinnvoll geordnet und berücksichtigen die unterschiedlichen Koordinationsformen. Die Wechselspannungssicherheitsfaktoren bei der Koordinationsform 2 beinhalten einen transienten Überspannungsfaktor, so daß auch das Isoliervermögen gegenüber Schaltspannungen gewährleistet wird. Aufbauend auf die vorangegangenen Untersuchungen ergibt sich für die Schaltstreckenisolierungen von Leistungsschaltern der Kategorie 1 eine Nennstehwechselspannung, die gemäß Gl. (6) zu bestimmen ist.

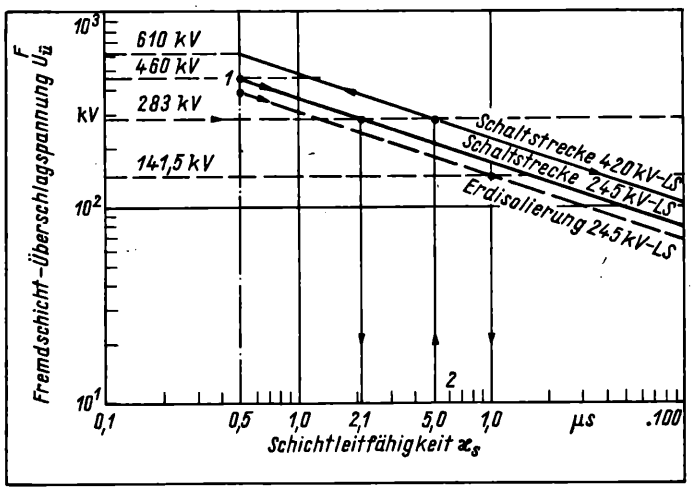



**Bild 5.** 245-kV-Leistungsschalter Kategorie 1
Bestimmung der zulässigen Schichtleitfähigkeit bzw. der erforderlichen Fremdschichtüberschlagspannung im sauberen, beregneten Zustand

$$U_{n\,s\,tw}^{EA1} = c_w^{EA1}\,(1 + c_{d,fmax})\,\frac{U_h}{\sqrt{3}} \qquad (6)$$

$c_{d,\,fmax}$ der jeweils größere der beiden Faktoren $c_d$ oder $c_f$. Dabei wird davon ausgegangen, daß nur beim Synchronisieren für eine längere Zeit die doppelte Leiter-Erde-Spannung über der Schaltstrecke anstehen kann ($\Delta f \approx 0$). Die Wahrscheinlichkeit, daß es während des Synchronisierens zu einer Spannungsüberhöhung durch Erdfehlereintritt (auf der Generator- und/oder Netzseite) kommt, ist sehr gering und bedarf in weiteren Untersuchungen einer genaueren Bestimmung.

Für den Wechselspannungssicherheitsfaktor $c_w^{EA1}$ müßte bei den Nennspannungen 12 bis 36 kV, im wesentlichen für Innenraumanlagen, der niedrigere Wert wie für die Trennstreckenisolierung (keine oder geringe Alterungsprozesse), und für die Nennspannungen 123 bis 420 kV, für Freiluftanlagen, der höhere Wert, wie für die Leiter-Erde-Isolierung angesetzt werden (Tafel 1, Spalte 10). Die durchgängige Annahme des Sicherheitsfaktors wie für Trennstreckenisolierungen würde praktisch zu Werten führen, die als Nennstehwechselspannung für Trennstrecken (Tafel 1, Spalte 9) festgelegt sind, die aber das unterschiedliche Alterungsverhalten der verschiedenen Isolierungen nur völlig ungenügend berücksichtigen.

Das so entstandene Ergebnis für die Schaltstreckenisolierung von Leistungsschaltern der Kategorie 1 ist in der Tafel 1, Spalte 11 eingetragen.

In der Tabelle 2 wird das Ergebnis der dargestellten Überlegungen mit den Angaben anderer Autoren am Beispiel der Schaltstreckenisolierung für einen 245-kV-Leistungsschalter der Kategorie 1 verglichen. Von unterschiedlichsten Belastungsannahmen ausgehend, werden Nennstehwechselspannungen berechnet, die durchweg höher sind als derzeit festgelegt.

*Böhm* [5] geht von der unterschiedlichen Belastung der Schaltstrecken und Erdisolierung (bei Erdfehler) aus und fordert das gleiche Verhältnis bei der Festlegung der Nennstehwechselspannung von 2/1,4; *Pfeiffer* [6] geht davon aus, daß im Extremfall auf der Generatorseite des Leistungsschalters ein Teilnetz mit Erdfehler bei freiem Sternpunkt entstehen kann ($c_f = 1{,}73$) und *Grabner* [7] berücksichtigt die Belastung bei der Ausschaltung eines zweipoligen Fehlers ohne Erdberührung ($c_f = 1{,}5$). Dazu kommen die unterschiedlichsten Annahmen für den Wechselspannungssicherheitsfaktor.

Der Aufwand für die Isolierung, der sich nach den Forderungen der Tabelle 1 ergibt, ist erheblich. Dabei wird die Diskrepanz zwischen den hohen Bemessungsforderungen und der relativ niedrigen Anzahl von Netzstörungen auf Grund von Durch- oder Überschlägen an Schaltstreckenisolierungen deutlich. Zukünftig muß deshalb analysiert werden, worin die tatsächlich existierendene „Bemessungsreserve" besteht. So wurde z. B. ein Teil der im Netzbetrieb befindlichen Leistungsschalter nach einem älteren Standard bemessen, in dem für die Schaltstreckenisolierung von 245-kV-Leistungsschaltern eine Nennstehwechselspannung von 535 kV gefordert wurde. Bei Leistungsschaltern im Grenzleistungsbereich wird bei vielen Schaltertypen die Anzahl der Löscheinrichtungen gegenüber den Standardtypen erhöht. Dadurch entsteht im ausgeschalteten Zustand eine zum Teil erhebliche Isolationsreserve usw.

## 4. Bemessung der Schaltgeräteisolierungen nach ihrer Fremdschichtüberschlagkennlinie

Die Fremdschichtüberschlagspannung eines Isolators kann bei Einhaltung bestimmter geometrischer Proportionen von Kriechüberschlagstrecke zu Schirmabstand und bei gleichmäßiger Verschmutzung nach Gl. (7) berechnet werden [11].

$$U_{\hat{u}}^F = K\ddot{u}_k\,\kappa_s^{-0{,}33} \qquad (7)$$

$U_{\hat{u}}^F$ Fremdschichtüberschlagspannung
$K$ Konstante
$\ddot{u}_k$ Kriechüberschlagstrecke
$\kappa_s$ Schichtleitfähigkeit

Dabei sind bei senkrechten Isolierungen die Bildung von Schwallwasser bei extrem starken Regen oder die Bildung von schirmüberbrückenden Eiszapfen nicht berücksichtigt. Dies muß mit konstruktiven Mitteln verhindert werden.

Bei Geräteisolatoren können darüber hinaus der Durchmesser der Isolatoren, die Einbaulage sowie unter bestimmten Bedingungen der Einfluß paralleler Isolierungen eine Rolle spielen. Mit der Physik des Fremdschichtüberschlages und diesen Einflußfaktoren beschäftigen sich *Pilling* und *Kynast* im gleichen Heft [11]. Die Umrechnung von leitfähigem Regen auf Schichtleitfähigkeit erfolgt nach Gl. (8).

$$\kappa_s = \kappa_{Regen}\,d \qquad (8)$$

$\kappa_{Regen}$ Regenwasserleitfähigkeit
$d$ Dicke der Wasserschicht = 0,005 cm

und sagt aus, daß leitfähiger Regen allein, d. h. ohne Grundver-

**Tafel 3.** Fremdschicht – Nennstehwechselspannung für Schaltstrecken von 245 kV – Leistungsschaltern der Kategorie 1

| Quelle | $C_{d1}$ | $C_{f1}$ | $C_{d2}$ | $C_{f2}$ | $C_{wF}^{EA1}$ | $U_{nstwF}^{EA1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Beier* [12] | 1,15 | 1 | – | – | 1,22.1,15 | **230** kV |
| *Grabner* [7] | 1,15 | 1 | 1,3 | 1 | 1 | **347** kV |
| *Pfeiffer* [6] | 1,25 | 1 | 1,15 | 1 | 1 | **340** kV |
| Autoren | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | **283** kV |

schmutzung, zu nur vergleichsweise geringerer Schichtleitfähigkeit führt, Regen mit 100 $\mu$S/cm z. B. zu einer Schichtleitfähigkeit von 0,5 $\mu$S.

In der Tafel 3 ist ein neuer Vorschlag für die Festlegung der Fremdschicht-Nennstehwechselspannung für Schaltstrecken am Beispiel eines 245-kV-Leistungsschalters der Kategorie 1 enthalten und wird mit den Forderungen anderer Autoren verglichen. Alle kurzzeitigen Spannungsüberhöhungen bleiben dabei unberücksichtigt. Das entspricht auch den von *Bargigia* [14] abgeleiteten Empfehlungen. Die Werte für die Schaltstrecken- und für die Leiter-Erde-Isolierung, ausgehend von den derzeitig üblichen Nennstehspannungen im sauberen, beregneten Zustand für einen 245-kV-Leistungsschalter, sind im Bild 5 eingetragen.

Im Bild 5 werden zwei Wege zur Auswertung der Fremdschichtüberschlagkennlinien gezeigt. Bei vorgegebener Fremdschichtüberschlagkennlinie kann abgelesen werden, bei welcher Schichtleitfähigkeit die geforderte Fremdschichtstehspannung unterschritten wird (Pfeilrichtung ab 1) oder welche Regenüberschlagspannung bei sauberer Isolierung gefordert werden muß, wenn man von einer vorgegebenen Fremdschichtstehspannung und Schichtleitfähigkeit bzw. Regenwasserleitfähigkeit ausgehen muß (Pfeilrichtung ab 2).

Die Schaltstreckenisolierung des 245-kV-Leistungsschalters, die im sauberen, beregneten Zustand ($\kappa_s \approx 0{,}5\,\mu$S) eine Nennstehwechselspannung von 460 kV besitzt, erreicht die in der Tafel 3 vorgeschlagene Fremdschichtnennstehwechselspannung von 283 kV bei einer Schichtleitfähigkeit von etwa 2,1 $\mu$S.

Kann am konkreten Standort der Schaltanlage eine höhere Schichtleitfähigkeit (z. B. 5 $\mu$S) auftreten, muß die Fremdschichtüberschlagkennlinie in vertikaler Richtung verschoben werden. Somit ergibt sich für den sauberen, beregneten Zustand eine Nennstehwechselspannung von etwa 610 kV, was bereits dem geforderten Stehvermögen der Schaltstreckenisolierung eines 420-kV-Leistungsschalters entspricht.

Um zu gesicherten Aussagen zur Bemessung nach der Fremdschichtüberschlagkennlinie zu gelangen, bedarf es im Fortgang der hier vorgestellten Überlegungen einer genaueren Untersuchung der Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens von extremen Fremdschicht- und extremen Spannungsbelastungen, des Einflusses der Einwirkdauer auf die Fremdschichtüberschlagspannung und des unterschiedlichen Verhaltens von Isolierungen bei gleichmäßiger Verschmutzung unter Laborbedingungen und bei natürlicher Verschmutzung.

## 5. Zusammenfassung

Der vorliegende Aufsatz beinhaltet Überlegungen zur Bemessung der Schaltstreckenisolierung von Leistungsschaltern. Es wird davon ausgegangen, daß eine Unterscheidung der Leistungsschalter nach ihrem Einbauort im Netz und nicht nach der Schaltgerätenennspannung erfolgen muß.

Die Einflußgrößen spannungserhöhender Vorgänge werden anhand von Meßergebnissen aus dem praktischen Kraftwerksbetrieb sowie Berechnungen auf praktisch auftretende Werte untersucht.

Aufbauend auf die als bewährt anzusehenden Nennstehwechselspannungen für die Leiter-Erde-Isolierungen werden Berechnungsgleichungen für die Schaltstreckenisolierung angegeben.

Der Einfluß leitfähiger Fremdschichten kann in dem Bemessungsmodell entweder durch einen angemessenen festgelegten Wechselspannungssicherheitsfaktor oder durch experimentelle Ermittlung der Fremdschichtüberschlagkennlinie berücksichtigt werden.

**Literatur**

[1] TGL 20445/02/Nov. 75 einschl. 1. Änderungsblatt vom 30. 10. 84: Isolationskoordination – Betriebsmittel und Anlagen mit Wechselspannungen über 1 kV; Technische Forderungen

[2] IEC 694/1980: Gemeinsame Bestimmungen für Hochspannungsschaltgeräte (engl.)

[3] *Schulze, H.:* Abstufung der Isolation an den Leistungsschaltern hoher Spannungen – ein Vorschlag zu ihrer Verbesserung. Elektrizitätswirtschaft 64 (1965) 4, S. 87–88.

[4] *Böhme, H.:* Schalt- und Trennstreckenisolierung $U_m$ = 12 bis 36 kV. Vorlage für den FUA 13. 3 „Hochspannungsschaltgeräte" der KDT vom 11. 09. 78

[5] *Böhm, K.:* Betrachtungen zum Einsatz von 220-kV-Leistungsschaltern als Generatorschalter für das KW Vetschau. Diskussionspapier vom 27. 06. 88. VEB Bergmann-Borsig

[6] *Pfeiffer, G.:* Zur Bemessung der Leiter-Erde- und Schaltstreckenisolierungen von Leistungsschaltern in Generatorabzweigen für die Spannungsebenen 220 kV und 380 kV. Diskussionspapier vom 8. 12. 88, ORGREB-Institut für Kraftwerke, Vetschau

[7] *Grabner, U.:* Bemessung der Leiter-Erde- und der Schaltstreckenisolierung von Leistungsschaltern in Generatorabzweigen für 220- und 420 kV. Diskussionspapier vom 07. 02. 90. Kombinat Verbundnetze Energie, Berlin

[8] *Ebner, M.:* Elektrische Beanspruchung der Schaltstreckenisolierung, insbesondere bei Kraftwerksschaltanlagen. TU Dresden, Sektion Elektrotechnik. Diplomarbeit Nr. 2227/89

[9] *Roth, A.:* Hochspannungstechnik, Kap. 77 „Die Nachbildung der praktischen Anforderungen durch die Prüfvorschriften". Wien: Springer Verlag, 1950

[10] VDE 0111/Teil 3/11.82 Isolationskoordination für Betriebsmittel in Drehstromnetzen über 1 kV. Anwendungsrichtlinie

[11] *Pilling, I.; Kynast, E.:* Verhalten von Geräteporzellanen bei extrem leitfähigen Fremdschichten. ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 12, S. 486–489

[12] *Beier, H.:* Bestimmung der Fremdschicht-Nennstehwechselspannung für TGL 8678. Vorlage für den FU 13.3 „Hochspannungsschaltgeräte" der KDT vom 11. 07. 1988

[13] *Bernhard, H.; Grasselt, H.:* Betrachtungen zur fremdschichtgerechten Bemessung von Schaltstrecken von Leistungsschaltern mit Synchronisieraufgaben der Spannungsebenen 245 kV und 420 kV. Kombinat Verbundnetze Energie /VEB TRO Berlin; Bericht vom 07. 03. 90

[14] *Bargigia, A.; u. a.:* Longitudinal insulation performance of HV circuit-breaker under the joint effect of pollution and temporary overvoltages. CIGRE-Session 1990, Paper 33–205, Paris, August/September 1990

EA 6202

# VDE-Studie '90 prognostiziert Mangel an Elektroingenieuren

Bis Mitte der 90er Jahre werden jährlich rund 14 000 frisch diplomierte Elektroingenieure auf dem Arbeitsmarkt gebraucht. Deutlich unter diesem Bedarf liegt die Zahl von jährlich rund 10 000 Hochschulabsolventen im Fach Elektrotechnik. Das ergibt eine Studie des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE). Die Berufschancen sind schon seit einigen Jahren besonders günstig. So führten die Arbeitsämter Ende 1989 bei Ingenieuren der Elektrotechnik nur 1,4 Bewerber auf eine offene Stelle. Die VDE-Studie '90 „Elektroingenieure in der Bundesrepublik Deutschland" zeigt auf, daß die volkswirtschaftliche und weltwirtschaftliche Bedeutung der Elektrotechnik in einem engen Zusammenhang mit einer hohen und weiter steigenden Beschäftigung von Ingenieuren steht.

Die Elektroindustrie erwartet auch für die erste Hälfte der 90er Jahre eine Zunahme der jährlichen Produktion von etwa vier bis fünf Prozent. Gut ausgebildete und forschungswillige Elektroingenieure sind für eine Produktionssteigerung notwendig. Dem Ausbildungssystem kommt somit eine besondere Bedeutung zu, damit die Herausforderungen der kommenden Jahre bewältigt werden können. Der VDE weist in seiner Studie eindringlich darauf hin, daß die apparative und räumliche Ausstattung der Hochschulen verbessert und die Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter und Professoren erhöht werden muß – insbesondere fehlen Mitarbeiter im technischen Mittelbau an den Fachhochschulen.

Die VDE-Studie '90 (Schutzgebühr 15,00 DM) ist erhältlich beim Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE), Stresemann-Allee 15 W-6000 Frankfurt am Main 70, Telefax: (069) 63 12 925.

Die Redaktion

(Nach: VDE-Pressedienst)

# Prüfung von $SF_6$-Leistungsschaltern bei extremer Spannungsbelastung

**H.-D. Zedler; H. Pliet; H.-H. Schramm; Berlin**

In der Energieversorgung des Gebietes der ehemaligen DDR werden Leistungsschalter der Siemens AG vom Typ 3AQ2 mit Schaltgerätenennspannungen von 245 kV und 420 kV eingesetzt.
Der Nachweis ihres Schaltvermögens, insbesondere unter Berücksichtigung einiger Netzknotenpunkte, bei denen die Beanspruchung über den von der Vorschrift IEC-56 geforderten Werten liegt, war zu erbringen. Die diesbezüglichen Schaltvermögensprüfungen wurden im Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik" in Berlin durchgeführt.

## 1. Beschreibung des Schalters

Der Leistungsschalter 3AQ2 ist ein 3poliger Blaskolbenschalter in Freiluftausführung, bei dem als Isolier- und Löschmittel $SF_6$-Gas eingesetzt wird. Das Funktionsschema zeigt die wesentlichen Teile der Unterbrechereinheit und ihr Zusammenwirken. Die Löschkammer enthält zwei feststehende Kontaktrohre, die an ihren einander zugewandten Enden Löschdüsen aus Graphit tragen und in der Einschaltstellung (Bild 1a) von einem beweglichen Schaltkontakt überbrückt werden. Dieser Schaltkontakt besteht aus ringförmig angeordneten federbelasteten Kontaktfingern und ist mit dem Blaszylinder starr verbunden. Den Kontaktfingern ist ein Abbrennring aus Graphit vorgelagert.
Im Raum zwischen Schaltkontakt und Blaszylinder befindet sich ein feststehender, ringförmiger Kolben. Beim Ausschalten wird durch die Bewegung des Blaszylinders gegen diesen Kolben das vom Blaszylinder umschlossene $SF_6$-Gas bis zur Kontakttrennung komprimiert.
Während der Lichtbogenlöschung (Bild 1c) umschließt der Blaszylinder den Düsenraum wie eine Druckkammer. Unter dem Einfluß des Lichtbogens wird der durch die mechanische Vorverdichtung erzeugte Löschgasdruck weiter erhöht, insbesondere, da das Kompressionsvolumen den Lichtbogenbereich unmittelbar umgibt. Dies wiederum führt zu einer besonders wirksamen Lichtbogenbeblasung ohne Druckverluste zwischen Blaszylindervolumen und dem Bereich zwischen den Löschdüsen. Das Löschgas strömt radial gegen den Lichtbogen und axial durch die Löschdüsen ab. Ein Blasgitter sorgt zusätzlich für eine gerichtete Löschgasströmung und zentriert den Lichtbogen.
In der Ausschaltstellung hat der Blaszylinder den Raum zwischen den Löschdüsen teilweise freigegeben (Bild 1d). Damit steht für die Spannungsbeanspruchung über dem offenen Schalter eine freie Gasstrecke zur Verfügung. Die Kontur der Löschdüsen ist auf eine hohe Spannungsfestigkeit dieser Strecke hin optimiert. Sie bestehen aus Graphit, dessen Oberfläche auch unter Lichtbogeneinwirkung unverändert glatt bleibt. Dementsprechend behält der Schalter auch nach Kurzschlußschaltungen seine volle, gegenüber dem Neuzustand unveränderte dielektrische Festigkeit.
Jeder Schalterpol ist mit einem Hydraulikantrieb ausgerüstet, so daß der Schalter für einpolige und dreipolige Kurzunterbrechungen eingesetzt werden kann. Die Schaltbewegung wird vom Elektrohydraulikantrieb über Umlenkgetriebe und die Schaltstange aus Isoliermaterial auf die zwei Unterbrechereinheiten des Doppelschaltkopfes übertragen. Jeder Unterbrechereinheit ist ein Kondensator zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Spannungsverteilung parallelgeschaltet.
In Tafel 1 sind die wichtigsten technischen Daten der Leistungsschalter zusammengestellt.

## 2. Geforderte Beanspruchungswerte

Die Anforderungen an das Schaltvermögen von Leistungsschaltern waren in der DDR in der Vorschrift TGL 16441 niedergelegt. Im Zuge der Weiterentwicklung wird diese Vorschrift derzeitig überarbeitet und weitgehend an die gültige IEC 56 angeglichen. Aus diesem Grunde wurden die Prüfungen entsprechend IEC 56 durchgeführt.
Bild 2 zeigt die Zusammenstellung der Spannungsbelastungen der Leistungsschalter in Abhängigkeit von der Nennspannung und dem Schaltfall. Diese Beanspruchungswerte werden an einigen Knotenpunkten des Energieversorgungsnetzes überschritten.
Untersuchungen am Netzanalysator, die an der TH Ilmenau durchgeführt worden sind, haben gezeigt, daß in der 245-kV-Schaltanlage des Kraftwerks Vetschau erhebliche betriebsfrequente Spannungserhöhungen sowie höhere Werte der Einschwingspannung auftreten können. Hier sind zwei 100-MW-Blöcke über etwa 1 km lange Kabel vor dem 245-kV-Leistungsschalter verbunden. Bei einem dreipoligen Kurzschluß ohne Erdberührung ist bei einem Kurzschlußausschaltstrom von 12 kA ein Scheitelwert der Einschwinspannung von $u_c = 555\,kV$, bei einer Spannungssteilheit $u_c/t_3 = 3\,kV/\mu s$, zu erwarten. Dieser Schaltfall ist im Bild 2 mit S1 bezeichnet. Ähnliche Spannungserhöhungen wurden in Netzstudien für die Umspannwerke Eula und Großdalzig ermittelt. Sie wird im Bild 2 mit S2 angegeben. Im Gegensatz zu den kraftwerksnahen Kurzschlüssen muß hier mit dem vollen Kurzschlußstrom von 40 kA, jedoch mit einer vom Netz bedingten geringeren Steilheit der transienten Einschwingspannung $u_c/t_3 = 1{,}1\,kV/\mu s$, gerechnet werden. In diesen Umspannungswerken, ebenfalls mit einer Nennspannung von 245 kV, ist damit der Scheitelwert der Einschwingspannung $u_c = 550\,kV$.
Tafel 2 zeigt eine Zusammenstellung der geforderten Prüfwerte und der in der Prüfung realisierten Werte.

## 3. Prüfanlagen im IPH

Leistungsschalter dieser Größe werden international in synthetischen Prüfanlagen geprüft.
Das Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik" – IPH – in Berlin verfügt über eine synthetische Prüfschaltung mit Stromüberlagerung und parallel zum Prüfling liegendem Hochspan-

**Tafel 1.** Technische Daten der Leistungsschalter

| Schaltgerät | dreipoliger Blaskolbenschalter | |
|---|---|---|
| Typ | 3AQ2 | |
| Nennspannung | 245–300 kV | 362–420 kV |
| Bemessungs-Blitzstoßspannung gegen Erde | 1050 kV | 1425 kV |
| Nennfrequenz | 50/60 Hz | |
| Nennstrom | 1600–3150 A | |
| Nenneinschaltstrom | 100/125 kA | |
| Nennkurzschlußausschaltstrom | 40/50 kA | |
| Transiente Wiederkehrspannung bei Klemmenkurzschluß | gem. VDE, IEC, ANSI | |
| Nennkurzschlußdauer | 3 s | |
| Nennschaltfolge | O-0,3s-CO-3min-CO | |
| Lösch- und Isoliermedium | $SF_6$-Gas | |
| Nenndruck bei 20 °C | 6,0 bar | |
| Antrieb | elektro-hydraulisch | |
| Druckbereich | 250–375 bar | |
| Nennspannung der Auslösespulen | 220 V– | |
| Schließzeit | 100 ± 5 ms | |
| Öffnungszeit | 45 ± 5 ms | |

Dipl.-Ing. *Hans-Dietrich Zedler* war zur Zeit der Abfassung stellvertretender Abteilungsleiter, Dipl.-Ing. *Horst Pliet* Abteilungsleiter am Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik". Dr.-Ing. *Heinz-Helmut Schramm* ist Abteilungsleiter bei der Siemens AG, Berlin.

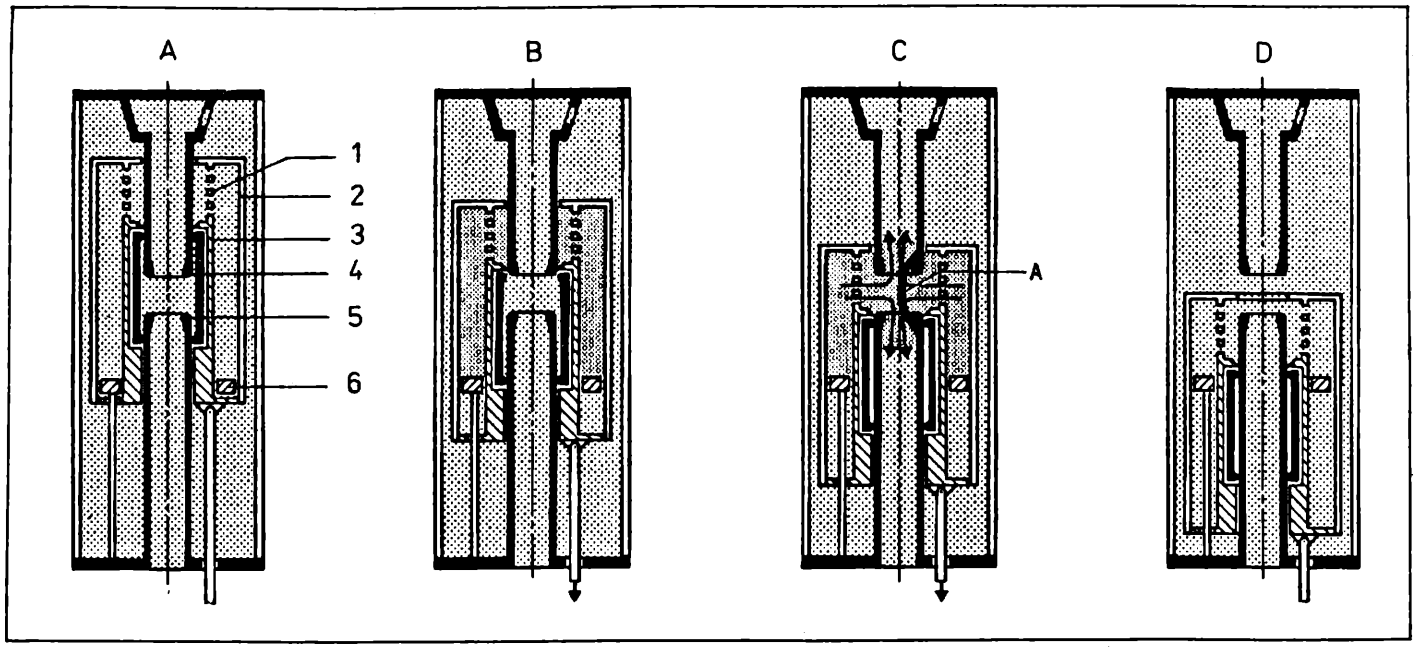



**Bild 1.** Funktionsschema der Unterbrechereinheit des Leistungsschalters, a) Schaltstellung „EIN"
b) Ausschaltung: Vorverdichtung
c) Ausschaltung: Löschung
d) Schaltstellung „AUS"
1 – Blasgitter
2 – Blaszylinder
3 – Schaltrohr
4 – Löschdüse
5 – Löschdüse
6 – Kolben

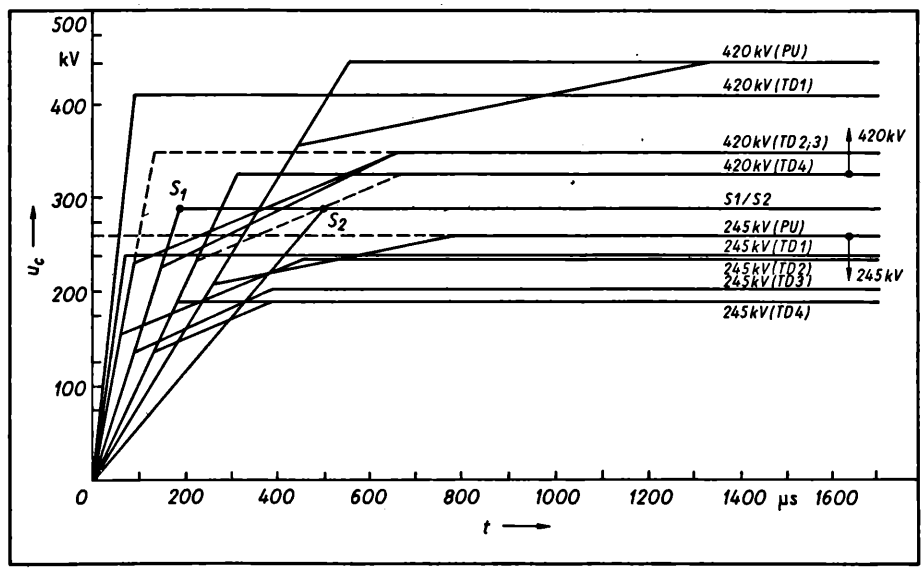



**Bild 2.** Geforderte Beanspruchungswerte. Zusammenstellung für die Nennspannungen von 245 kV und 420 kV in Abhängigkeit vom Schaltfall, Parameter für 1/2-Pol-Prüfungen, S1, S2 – Sonderschaltfälle

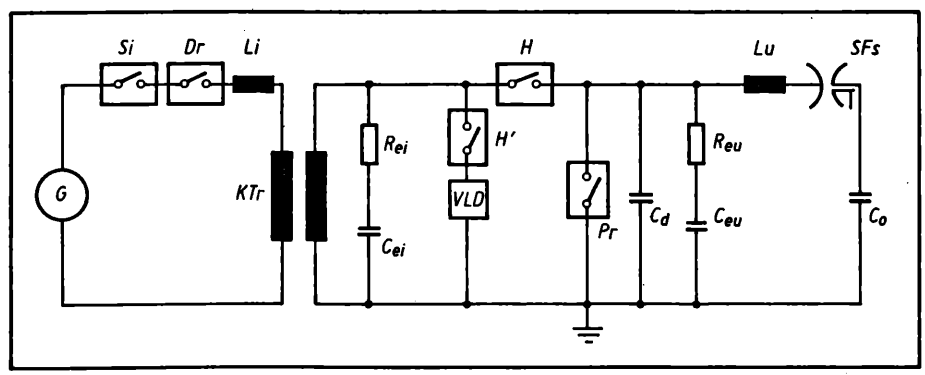



**Bild 3.** Synthetischer Prüfkreis mit Stromüberlagerung
G – Stoßkurzschlußgenerator; KT – Stoßkurzschlußtransformator; S – Sicherheitsschalter; Dr – Draufschalter; Li, Lu – Drosselspulen; Ce, Cd – Einschwingkondensatoren; Co – Hauptbatterie; Re – Einschwingwiderstand; SFs – Schaltfunkenstrecke; H, H' – Hilfsschalter; Pr – Prüfschalter; VLD – Lichtbogenverlängerungseinrichtung; Index i – Stromkreis; Index u – Spannungskreis

nungskreis. Bild 3 zeigt eine Übersicht über den Prüfkreis für synthetische Prüfungen von Leistungsschaltern. Die Anlage gestattet Belastungsprüfungen bis zu Ausschaltströmen von 63 kA und Schaltgerätenennspannungen von 245 kV (Vollpol) bzw. Halb-Pol-Prüfungen für Schaltgeräte mit einer Nennspannung von 420 kV.

**Hochstromkreis**

Der Hochstromkreis der synthetischen Prüfschaltung wird durch Einspeisung aus dem Netz oder der zwei Kurzschlußgeneratoren des Prüffeldes betrieben. Die am Prüfobjekt bereitstehende einpolige Leistung beträgt bis zu 1500 MVA.

Für die Aufrechterhaltung des Lichtbogens bis zur jeweiligen Löschbereitschaft des Prüfobjektes stehen Wiederzündeinrichtungen zur Verfügung, die ein vorzeitiges Erlöschen des Lichtbogens im Stromnulldurchgang durch die Überlagerung steiler Stromimpulse verhindern.

**Hochspannungskreis**

Der Hochspannungskreis ist für eine Ladespannung von 450 kV ausgelegt. Die gespeicherte Energie beträgt 1,1 MWs. Die in Ebenen angeordneten Kondensatoren lassen sich den jeweils benötigten Ladespannungen und Kapazitätswerten durch fernbetätigte Umschaltung optimal anpassen.

Den Erfordernissen entsprechend ist die Form der Einschwingspannung nach der 2-Parameter- oder 4-Parameter-Festlegung

**Tafel 2.** Zusammenstellung der geforderten Prüfwerte und der in der Prüfung realisierten Werte

Klemmkurzschluß

| Prüffall | Sollwerte 245 kV | | | 420 kV | | Prüfbeanspruchung | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $I_a$ kA | $u_c$ kV | $u_c/t_3$ kV/s | $u_c$ kV | $u_c/t_3$ kV/s | $I$ kA | $u_c$ kV | $u_c/t_3$ kV/s |
| TD5 | 40 | 332 1)<br>336 2) | 2 | 553 1)<br>591 2) | 2 | 41,0 | 654 | 2,1 |
| TD4 | 40 | 364 | 2 | 624 | 2 | 40,0 | 654 | 2,1 |
| TD3 | 24 | 390 | 3 | 669 | 3 | 24,9 | 669 | 3,13 |
| TD2 | 12 | 450 | 5 | 669 | 5 | 13,3 | 698 | 5,5 |
| TD1 | 4 | 459 | 7 | 787 | 8,9 | 4,3 | 807 | 8,3 |
| PU2 | 10 | 500 | 1,54 | 857 | 1,54 | 10,3 | 871 | 1,6 |
| S1 | 12 | 550 | 3 | – | – | 13,3 | 698 | 5,5 |
| S2 | 40 | 550 | 1,1 | – | – | 40,0 | 654 | 2,1 |

TD5: Gleichstromglied 40 %, geprüft 40 – 47 %
1) große Stromwelle 2) kleine Stromwelle

Abstandskurzschluß

| Prüffall | Sollwerte 245 kV | | | 420 kV | | Prüfbeanspruchung | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $I_a$ kA | $u_T$ / $u_c$ kV | $u_T/t_L$ / $u_c/t_3$ kV/s | $u_T$ / $u_c$ kV | $u_T/t_L$ / $u_c/t_3$ kV/s | $I$ kA | $u_T$ / $u_c$ kV | $u_T/t_L$ / $u_c/t_3$ kV/s |
| L90 | 36 | 36,4<br>272 | 8,17<br>2 | 65<br>466 | 8,54<br>2 | 36 | 67,7<br>466 | 8,8<br>2 |

Werte auf den Vollpol bezogen

einstellbar. Der Einsatz einer zusätzlichen Einrichtung gewährleistet die Parameter der ITRV im Anfangsbereich der Einschwingspannung. Der Schaltfall Abstandskurzschluß wird durch den Einsatz einer aus 10 Gliedern bestehenden Leitungsnachbildung realisiert.

**Prüfanforderungen**

Die gesamte Steuerung des Prüfablaufes wird durch einen Rechner mit nachgeschalteten Impulsverstärkern realisiert. Der Rechner ist durch Schirmung und durch den konsequenten Einsatz von Lichtleitstrecken vor Störbeeinflussungen geschützt. Die Einstellgenauigkeit beträgt 1°el. Bild 4 zeigt den Ausdruck des eingestellten Steuerprogramms für eine synthetische Kurzunterbrechungsprüfung. Bedienfreundlichkeit und die Möglichkeit der Speicherung und Aktivierung bewährter Steuerprogramme zeichnen dieses Steuergerät aus.

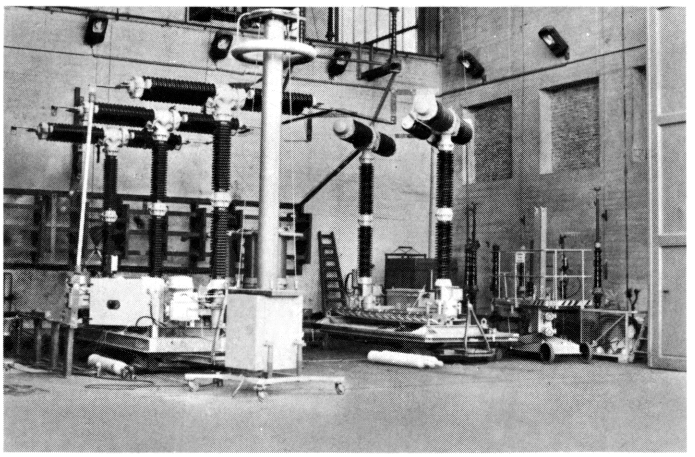


**Bild 4.** Aufbau des Prüflings (links) in der Prüfhalle. Einsatz des Hilfsschalters (rechts) erfolgt nur bei einem Ausschaltvermögen von 50 kA

Die Anregung der Schaltfunkenstrecken erfolgt von einer dezentralen Steuereinheit, einem Stromnullvorfühler. Diese Steuereinheit löst die jeweiligen Schaltfunkenstrecken mit hoher Präzision zum vorgewählten Zeitpunkt in Abhängigkeit von dem veränderlichen Zeitpunkt des Stromnulldruchganges aus.

**Messung**

Sämtliche Vorgänge werden mit Elektronenstrahloszillografen aufgezeichnet. Neben einem 21-strahligen Oszillografen mit einer zeitlichen Auflösung bis zu 3 m/s steht ein 6-strahliger Oszillograf mit einer zeitlichen Auflösung bis zu 50 m/s zur Verfügung. Darüber hinausgehende zeitliche Auflösungen werden mit Oszilloskopen bzw. Transientenrekordern realisiert.

## 4. Ablauf der Prüfung

Der Nachweis des Schaltvermögens mußte für die Nennspannung von 245 kV bei einem Nennausschaltstrom von 40 kA und für die Sonderschaltfälle S1 und S2 (siehe Bild 2 und Tafel 2 „geforderte

**Bild 5.** Oszillogramm einer Ausschaltung für den Prüffall; Klemmenkurzschluß mit asymmetrischem Stromverlauf (Schaltfall 5)

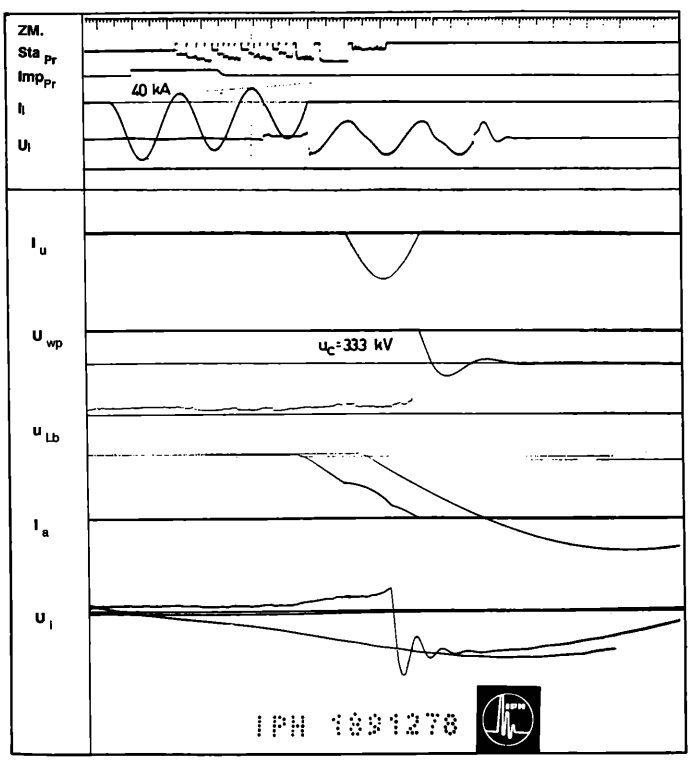
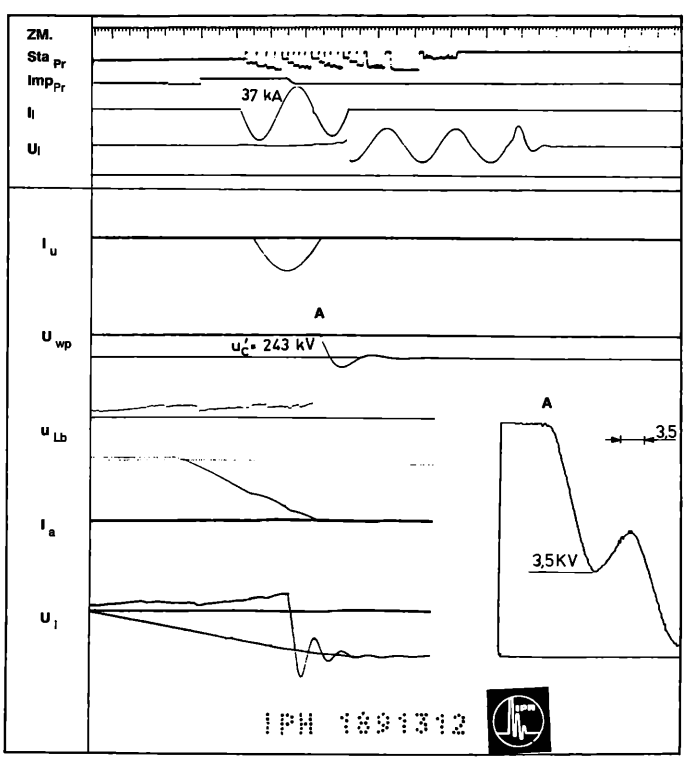



**Bild 6.** Oszillogramm einer Ausschaltung für den Prüffall Abstandskurzschluß 90 %



SIEMENS

# 25 Jahre jung: $SF_6$-Schalttechnik von Siemens

Ob Amerika, Asien oder Europa: $SF_6$-Schalttechnik von Siemens sorgt seit über 25 Jahren weltweit für eine sichere Energieversorgung.

Bei Innovationen in der Elektrotechnik waren wir schon immer weltweit führend.

So setzte Siemens bereits 1963 als einer der ersten Hersteller in Europa $SF_6$-Gas als Isolier- und Löschmedium in Hochspannungsleistungsschaltern ein.

Durch konsequente Weiterentwicklung dieser neuen Technologie konnte bereits 1968 die erste komplett metallgekapselte, $SF_6$-gasisolierte Hochspannungsschaltanlage von Siemens in Betrieb genommen werden.

Dank des hohen Qualitätsstandards unserer Schaltgeräte und -Anlagen garantieren wir jahrzehntelange Wartungsfreiheit bei größtmöglicher Zuverlässigkeit. Basis unseres Erfolges ist die intensive Forschung und die kontinuierliche Weiterentwicklung unserer hochwertigen Technik bei höchstem Qualitätsstandard.

Seit 1988 ist die dritte Generation unserer $SF_6$-Hochspannungs-Leistungsschalter lieferbar – leichter, einfacher und zuverlässiger bei gleichzeitiger Steigerung des Ausschaltvermögens.

Bei Hochspannungs-Schaltgeräten und -Schaltanlagen sind wir der richtige Ansprechpartner für Sie. Innovativ mit modernster Technik; traditionsverbunden mit der längsten Betriebserfahrung.

## Auf Zukunft schalten. $SF_6$- Schalttechnik von Siemens.

E50001-U220-Z1 VC&D

Weitere Informationen
erhalten Sie von:

Siemens AG, Infoservice EV/Z 198
Postfach 2348, D-8510 Fürth

**Tafel 3.** Ausdruck des Steuerrechners Prüfablaufprogramm:

| LfN | Kanal | Gerät | Halbwelle/Grad | | Ein/Aus/Imp. |
|---|---|---|---|---|---|
| 01 | 96 | PAS-RESET | 00000 | 000 | I |
| 02 | 04 | Dr. 2-R: | 00301 | 000 | I |
| 03 | 06 | Dr. 2-T: | 00304 | 070 | I |
| 04 | 21 | Pr. A SV01 | 00306 | 250 | I |
| 05 | 23 | Hi 1A SV02 | 00307 | 010 | I |
| 06 | 12 | Vld 2 – | 00308 | 210 | I |
| 07 | 13 | Vld 2 + | 00309 | 210 | I |
| 08 | 28 | SCI E SV05 | 00295 | 000 | I |
| 09 | 29 | SCI A SV05 | 00307 | 110 | I |
| 10 | 14 | FS | 00310 | 220 | I |
| 11 | 76 | Si.2 AUS | 00302 | 000 | I |
| 12 | 77 | Si.2 AUS | 00302 | 000 | I |
| 13 | 80 | EO-06: Hell | 00297 | 000 | E |
| 14 | 80 | EO-06: Dunk | 00307 | 000 | A |
| 15 | 81 | EO-21: Hell | 00275 | 000 | E |
| 16 | 81 | EO-21: Dunk | 00315 | 000 | A |
| 17 | 83 | Oszi-STOP | 00350 | 000 | I |
| 18 | 89 | Antr. 2 AUS | 00222 | 000 | I |
| 19 | 88 | ERREGUNG | 00011 | 000 | I |
| 20 | 86 | Entregung | 00320 | 000 | I |
| *21 | 93 | ZYKL. ‹O› | 00010 | 000 | I |
| 22 | 04 | Dr. 2-R: EIN | 00286 | 000 | I |
| 23 | 06 | Dr. 2-T: EIN | 00287 | 155 | I |
| 24 | 20 | PR. EIN | 00282 | 110 | I |
| 25 | 81 | EO 21 HELL | 00260 | 000 | E |
| *26 | 93 | ZYKL. ‹CO› | 00020 | 000 | I |
| 27 | 04 | Dr. 2-R: EIN | 00258 | 000 | I |
| 28 | 06 | Dr. 2-T: EIN | 00261 | 105 | I |
| 29 | 21 | PR. AUS 1 | 00263 | 120 | I |
| 30 | 81 | EO-21: Hell | 00210 | 000 | E |
| 31 | 10 | VLD –1 | 00265 | 060 | I |
| 32 | 11 | VLD +1 | 00266 | 060 | I |
| 33 | 30 | SAI EIN | 00100 | 000 | I |
| 34 | 31 | SAI AUS | 00260 | 000 | I |
| End | 93 | ‹O-tu-CO› | | | |

Prüfwerte") sowie für die Nennspannung von 420 kV mit dem Nennausschaltstrom von 40 kA erbracht werden.

Um den Aufwand für die Durchführung der Prüfungen zu reduzieren, wurde von den Verantwortlichen der Siemens AG folgende Prüfungsdurchführung vorgeschlagen.

Ein 245-kV-Leistungsschalter wurde mit den Spannungswerten belastet, die für einen 420 kV Leistungsschalter vorgeschrieben sind. Damit konnte der Nachweis des Schaltvermögens für beide Schaltertypen erbracht werden. Um die härtesten Prüfbedingungen für den Leistungsschalter zu realisieren, wurde die Form der Einschwingspannung nach dem 2-Parameterverfahren gewählt.

Bei dieser Prüfungsdurchführung sind die für die Nennspannung von 245 kV geforderten Sonderschaltfälle S1 und S2 im Schaltvermögensnachweis enthalten und müssen nicht gesondert nachgewiesen werden (siehe Bild 2).

Den Aufbau des Prüflings in der Prüfzelle des IPH zeigt Bild 4. Die Prüfungen unter den Bedingungen des Klemmenkurzschlusses wurden vom Prüfling bestanden. Bild 5 zeigt die Oszillogramme der erfolgreichen Ausschaltung eines unsymmetrischen Kurzschlußstromes mit einem symmetrischen Strom von 40 kA und einem Gleichstromglied von 40 %. Der Scheitelwert der Wiederkehrspannung betrug, umgerechnet auf eine Vollpol-Prüfung, 640 kV bei einer Spannungssteilheit von 2,07 kV/μs. Der Löschbereich wurde bei den Schaltfällen 4 und 5 für Lichtbogenzeiten von 9 ms bis 18,5 ms nachgewiesen.

Der Nachweis des Schaltvermögens unter den Bedingungen des Abstandskurzschlusses wurde ebenfalls bestanden. Bild 6 zeigt die Oszillogramme der Ausschaltung eines Kurzschlußstromes von 37 kA entsprechend eines Abstandskurzschlusses von 90 %. Bezogen auf den Vollpol betrug der Wellenwiderstand der Leitungsseite 450 Ω, die Steilheit der einschwingenden Spannung auf der Speiseseite 2 kV/μs.

Das Schaltvermögen bei Phasenungleichheit wurde mit 25 % des Nennkurzschlußstromes bei einem Spannungsfaktor von 2 nachgewiesen. Auf eine Vollpolprüfung umgerechnet wurde der 245 kV-Leistungsschalter bei einem Ausschaltstrom von 10 kA mit einem Scheitelwert der transienten Einschwingspannung von 871 kV ($u_c/t_3$ = 1,6 kV/μs) belastet.

### Zustand der Kontakte nach der Belastung

Nach den Schaltvermögensprüfungen erfolgte eine Demontage und Kontrolle des Leistungsschalters. Die begutachteten Schaltstrecken waren durch 18 Ausschaltungen belastet. Die Stromsumme betrug 630 kA. Bild 7 zeigt die Löschdüsen nach der Prüfung. Die Oberfläche der Löschdüsen war durch den Lichtbogen nicht unzulässig angegriffen, sie zeichneten sich durch eine homogene Oberfläche aus. Der Zustand der Kontakte war als gut zu bezeichnen, es zeigte sich kein unzulässiger Kontaktabbrand.

## 5. Schlußbemerkung

Der Ablauf der Prüfung, die Spannungsbeanspruchung des geprüften Schalters, die erreichte Stromsumme sowie der Zustand des Schalters nach der Prüfung zeigen die hohe Sicherheit, mit der die Schalter 3AQ2 arbeiten. Diese Sicherheit, zusammen mit der Zuverlässigkeit gegenüber mechanischen, thermischen und dielektrischen Beanspruchungen sind die Voraussetzungen für ungestörten Netzbetrieb und kontinuierliche Energieversorgung.

EA 6230

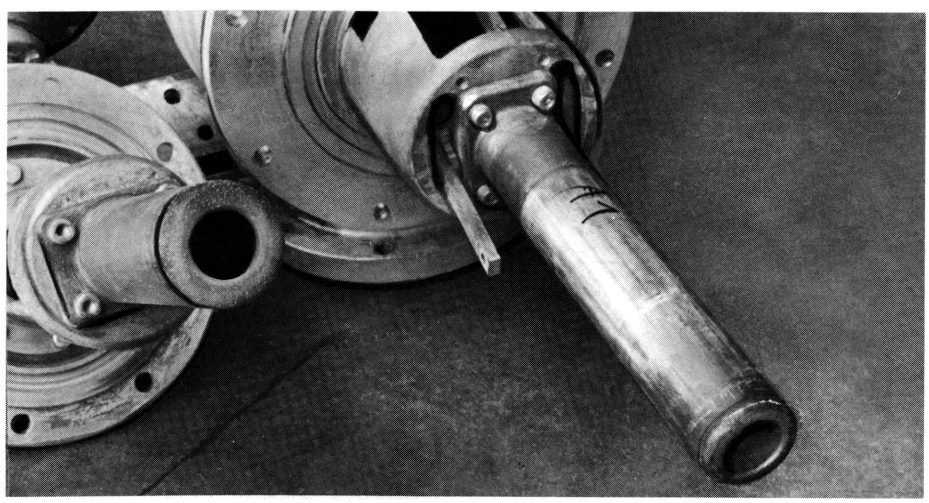


**Bild 7.** Löschdüse nach der Belastung mit einer Stromsumme von 630 kA

# Austausch von Schaltgeräten 245 und 420 kV

**U. Grabner, Berlin; W. Sidorf, Greifswald; H. Eggert, Berlin**

Die Leistungsschalter-Grundausstattung im 245- und 420-kV-Netz der DDR bis 1986 wurde ausschließlich durch Druckluft-Leistungsschalter der Typreihen

- D3 AF5/220 kV/23 kA Säulenbauart, Baujahr bis 1965
- D3 AF6/220 kV/26 kA Druckkammer, Baujahr ab 1965
- D3 AF72/245 kV, 420 kV/40 kA Druckkammer, Baujahr ab 1970
- D3 AF82/245 kV, 420 kV/50 kA Druckkammer, Baujahr ab 1975

des VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht" (TRO) gebildet.

Weiterhin sind in einigen 245 kV-Schaltanlagen noch Freistrahl-Leistungsschalter CPF 10087/220 kV/26 kA, Baujahr 1959/60 der Fa. AEG in Betrieb. Bedingt durch hohe Ausfallrate, hohen Aufwand für Störbeseitigung, Generalinstandhaltung und Modifizierung und hohes Alter, wurde 1986 mit dem Austausch gegen moderne $SF_6$-Leistungsschalter begonnen. Die Trennschalter-Grundausstattung im 245- und 420 kV-Netz der DDR wurde ausschließlich durch die Typreihen des VEB TRO gebildet.

- Drehtrenner THF
- Klapptrenner KHAF
- Hebeltrenner THAF

} mit Druckluftantrieb einschl. pneumatischer Steuerung für Rückmeldung und Verriegelung

sowie Erdungsschalter mit Hand- bzw. Druckluftantrieb (Bild 1).

Hohe Ausfallraten (Porzellan-Flansch-Verbindung, Kontaktendstellung, pneumatische Steuerung u. a.) erforderten eine Neuausrüstung mit Trennern höherer Zuverlässigkeit sowie mit einem neuen modernen, elektronischen Steuerungssystem (Bild 3b).

Über Erfahrungen beim Austausch der Druckluft- gegen $SF_6$-Leistungsschalter und Trennschalter mit Druckluftantrieb gegen solche mit Motorantrieb wird berichtet.

## 1. Ausgangssituation im Schaltfeld

### 1.1. Leistungsschalter

*1.1.1. Fundamente*

Jeder Druckluft-Leistungsschalter steht auf einem gemeinsamen oder einzelnen Fundament mit Fahrschienen-Spurweite 1435 mm. Die Höhe der Schienen über Boden beträgt etwa 900 mm. Es existieren Streifenfundamente längs und quer, Fertigteilfundamente oder gerammte Betonstiele mit aufgelegten Bahnschienen (Bild 2). Eine bauseitige Erneuerung der Fundamente ist nur in Ausnahmefällen (Bauzustand durch Alterung, Reaktionskräfte) zwingend notwendig. Auf gleichem Schienenfundament stehen in der Regel auch der Kombinationswandler oder die getrennten Strom- und Spannungswandler.

*1.1.2. Abstände*

Für den Abstand Boden bis Beginn der Erdisolation sind 2300 mm bei Wegfall der Umzäunung einzuhalten, um die Bedingungen für $SF_6$-Leistungsschalter ($SF_6$-Nachfüllung, Handnotausschaltung, Kontrolle von Drücken, Relais, Heizung u. a.) während des Betriebes zu gestatten.

Der vorhandene Polmittenabstand ist in der Regel größer als der benötigte.

*1.1.3. Niederspannungssteuerung*

Bei der LS-Typreihe D3 AF6, 7, 8 existiert eine im Steuerschrank angeordnete Niederspannungssteuerung (NS2). Für ältere LS-Typen steht Steuerschrankraum für den Einbau einer vorgefertigten Niederspannungssteuerung nicht zur Verfügung.

### 1.2. Trennschalter

*1.2.1. Fundamente*

Jeder Trennschalterpol steht auf zwei gerammten Betonpfahlfundamenten, auf die der Grundrahmen (2 × U-Träger) befestigt ist (Schweißverbindung mit der Betonpfahlarmierung).

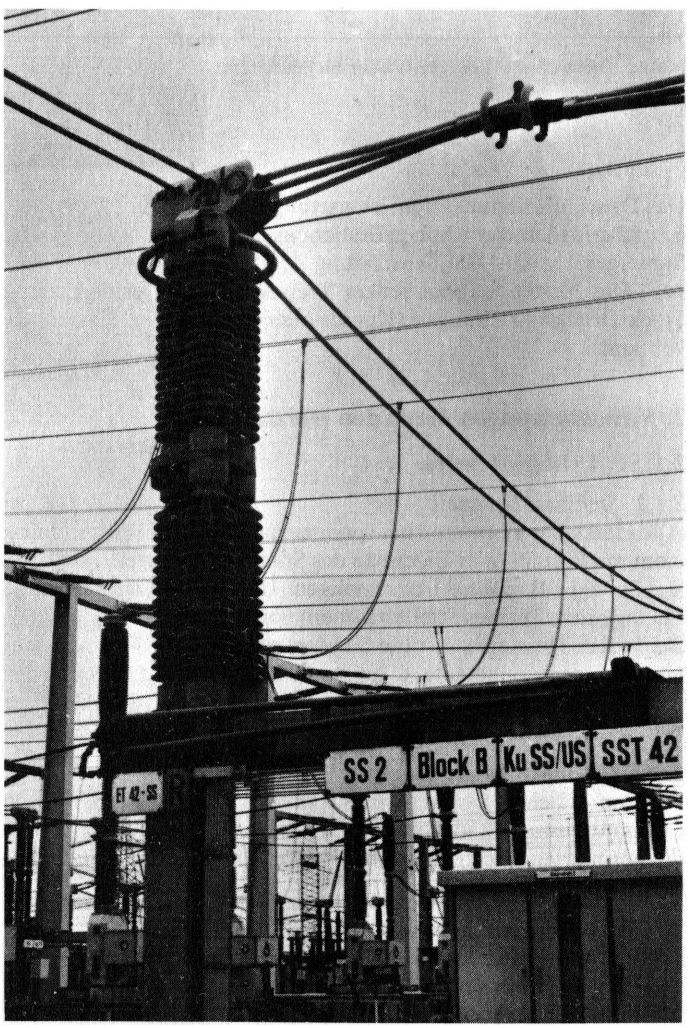
Eine Stützerseite des Trennschalterpoles trägt die Sammelschiene in Seilausführung ohne Abspannung, so daß die Zugkräfte nur vom Trennschalter einschl. Fundament aufgenommen werden müssen. Durch die Rammtechnologie stehen die Betonpfahlfundamente nicht immer senkrecht und maßgerecht zueinander.

*1.2.2. Pneumatische Steuerung*

Die Trennschalter von TRO werden durch Druckluft-Steuergeräte des Starkstromanlagenbau Cottbus angesteuert (Bild 3a). Das Gerät erfüllt folgende Funktionen

- Umwandlung elektrischer Ein- oder Aus-Kommandos in pneumatische Kommandos
- pneumatische Verstärkung und Ansteuerung der Trennschalter-Druckluftantriebe
- Rückführung von Umsteuerluft nach Erreichen der Trennschalter-Endstellung zur Betätigung eines Hilfsschalters
- Verriegelungssystem über Hilfsschalterkreise oder Riegelschiene entsprechend üblicher Abhängigkeiten in Schaltanlagen.

**Bild 1.** Klapptrennschalter KHAF – 245 kV mit angebautem, handgetriebenem Erdungsschalter




Dipl.-Ing. *Uwe Grabner*, Verbundnetz Elektroenergie-AG, Abt. Übertragung, Hochspannungsschaltgeräte; Ing. *Wolfgang Sidorf*, Energiewerke Nord-AG, Abt. Energieabführung; Obering. *Horst Eggert*, Siemens-AG, Schaltwerk Hochspannung, Leitung der Prüffelder.

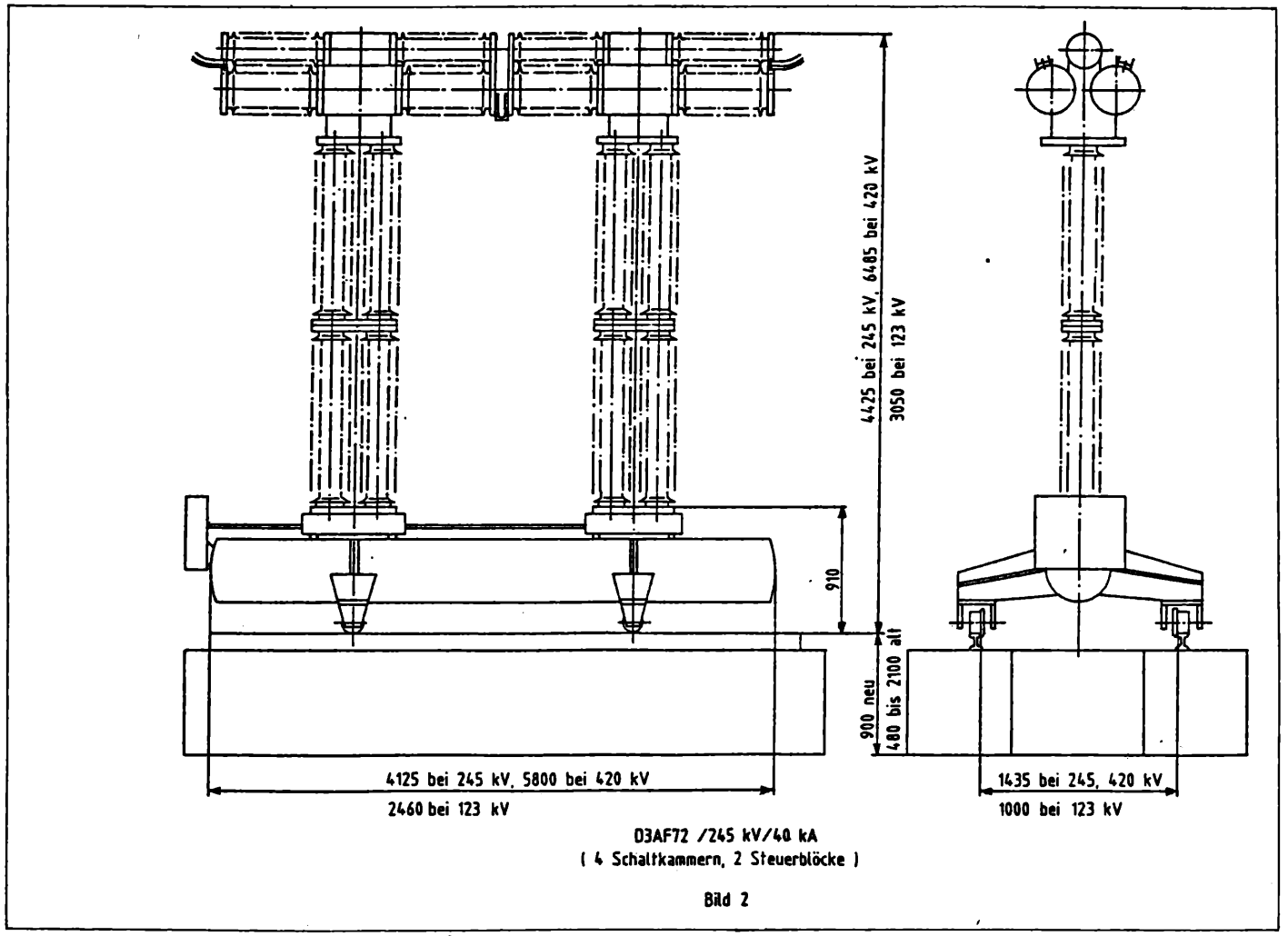
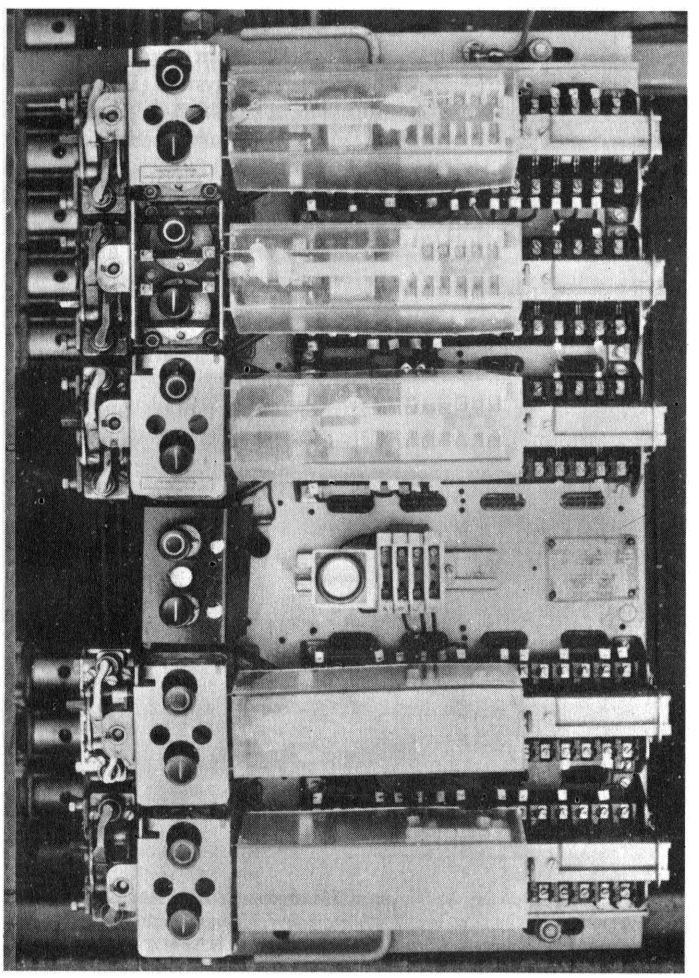



**Bild 2.** Druckkammer-Leistungsschalter mit Fundament

**Bild 3a.** Druckluft-Steuergerät



Das Druckluft-Steuersystem ist wartungsaufwendig und störanfällig und erfordert einen hohen Bedienungsaufwand. Das Druckluft-Steuergerät gehört zur Ausrüstung des Schaltfeld-Steuerschrankes. Die Verbindung zu jedem Trennschalterpol erfolgt mit 4 Stück Druckrohrleitungen (Kupfer oder Polyamid im Plastkabelverband).

## 2. Voraussetzungen durch den Hersteller

### 2.1. $SF_6$-Leistungsschalter

*2.1.1. Stahlbau-Unterteil*

Alle Hersteller montieren bei 1poliger Bauweise auf Plattenfundament mit Fremd- oder Eigenbau des Stahlbau-Unterteils.
Bei 3poliger Bauweise bzw. 3poligem Untergestell wird 2säulige Auflage bzw. 2faches Stielfundament vorgesehen.
Bei jedem Hersteller ist eine Sonderanpassung an die vorhandenen Schienenfundamente, d. h. in der Regel Eigenentwicklung des Käufers erforderlich, um Höhenanpassung und Schienenauflage einschließlich Befestigung sicherzustellen. (Bild 4)

*2.1.2. Hochspannungsanschluß*

Für den üblichen Doppelseilanschluß mit Deckelstromklemmen (Armaturenwerk Radebeul) sind Platten-Adapter notwendig, da die normierten Lochmaße nicht mit den Klemmenmaßen übereinstimmen.

*2.1.3. Niederspannungssteuerung*

Die meisten Hersteller bieten Standardlösungen von Niederspannungssteuerungen im Schaltschrank, befestigt am Leistungsschalter-Unterteil, für jeden Leistungsschalter-Typ an. (Bild 5)

Durch die Herausbildung von Grundsätzen zur Steuerungstechnik war eine Anpassung bzw. Neuentwicklung notwendig und wurde von den Herstellern und Betreibern realisiert.
Von allen Herstellern wird angestrebt, durch Vorverdrahtung innerhalb der Pole oder zwischen den Polen (3poliges Untergestell) und durch Konfektionierung der Steuertafel-Anschlüsse den Verdrahtungsaufwand im Schaltfeld zu minimieren.

*2.1.4. Werkendprüfung*
Eine umfassende Werkendprüfung reduziert den Aufwand bei der Schalterendprüfung im Schaltfeld.
Von allen Herstellern wird eine Werkendprüfung mit folgenden Messungen bzw. Aufzeichnungen durchgeführt:
- Schalteigenzeiten
- Zeit-Weg-Verläufe
- Übergangswiderstände bzw. Spannungsfall über der Hauptstrombahn
- Ansprechwerte der $SF_6$-Dichtewächter, Öl-Druckwächter, Druckwächter für Meldung, Sperre, Motoranlauf
- Hochspannungsstückprüfung der Schaltkammern
- Dichtheit der Lösch- und Antriebsräume
- Funktionsprüfungen der Niederspannungssteuerung.

Für die Schalterendprüfung im Schaltfeld kann der Aufwand klein gehalten werden.

*2.1.5. Transport-Verpackung*
Die Zahl der zu montierenden Baugruppen und der Aufwand für die Vorbehandlung (Reinigung, Aufbereitung von Flanschen und Dichtungen) der Baugruppen sowie der Umfang der Arbeitsgänge bestimmen Montagetechnologie und -dauer.
Ein Minimum an Montagezeit entsteht, wenn 1-Kammer-Leistungsschalter-Pole bereits komplett montiert und mit $SF_6$-Vorfülldruck versehen zum Schaltfeld kommen.
Bei 2-Kammer-Leistungsschalter-Polen mit abgeflanschten, trokkener Gasfüllung versehenen Kammern und Erdisolatoren bleibt die Vorbehandlung der Baugruppen vor der Montage gering.
Der Umfang der Vorbehandlung steigt erheblich, wenn z. B. Erdisolatoren ohne Abflanschung und unter Verwendung ungeeigneter Verpackung verschmutzt (innen und außen) den Einsatzort erreichen. Die Vorbehandlung im Schaltfeld erfordert außerdem trockenes Wetter.

*2.1.6. Montagevoraussetzung*
Einen besonders kritischen Arbeitsgang stellt die Kupplung der Schaltstange mit dem Gestänge des Doppelschaltelementes dar, welches während des Koppelns frei am Kranhaken hängt und in seiner Lage auch bei Wind fixiert werden muß.

*2.1.7. Zubehör für Schalterendprüfung*
Jeder Hersteller benutzt sein speziell angepaßtes Zubehör für
- Evakuierung der LS-Innenräume
- $SF_6$-Füllung über Fülladapter
- Messung von Drücken, Öl, $SF_6$, Duckluft
- Messung des Feuchtegehaltes im $SF_6$, in Druckluft als Taupunkt-Messung
- Messung des Luftanteils im $SF_6$
- Prüfung auf $SF_6$-Dichtheit.

Eine Normierung der Verbindungstechnik steht aus, so daß für jeden Hersteller angepaßte Verbindungen vorhanden sein müssen.

## 2.2. Trennschalter

*2.2.1. Stahlbau-Unterteil*
Der Abstand Trennschalter–Stützer eines Poles ist kleiner als bei den Trennschaltern von TRO.
Bei Beibehaltung der Betonrammpfähle ist ein Stahlbauadapter notwendig, der neben dem Aufbau des Trennschalters auch den paßgerechten Anbau des Motorantriebes gestattet.
Durch den Stahlbau-Adapter ist ebenso eine Höhenanpassung zum Boden sowie zur Sammelschiene notwendig. (Bild 6)

*2.2.2. Hochspannungsanschluß*
Die Trennschalter mußten auf Eignung beim Querzug durch unab-

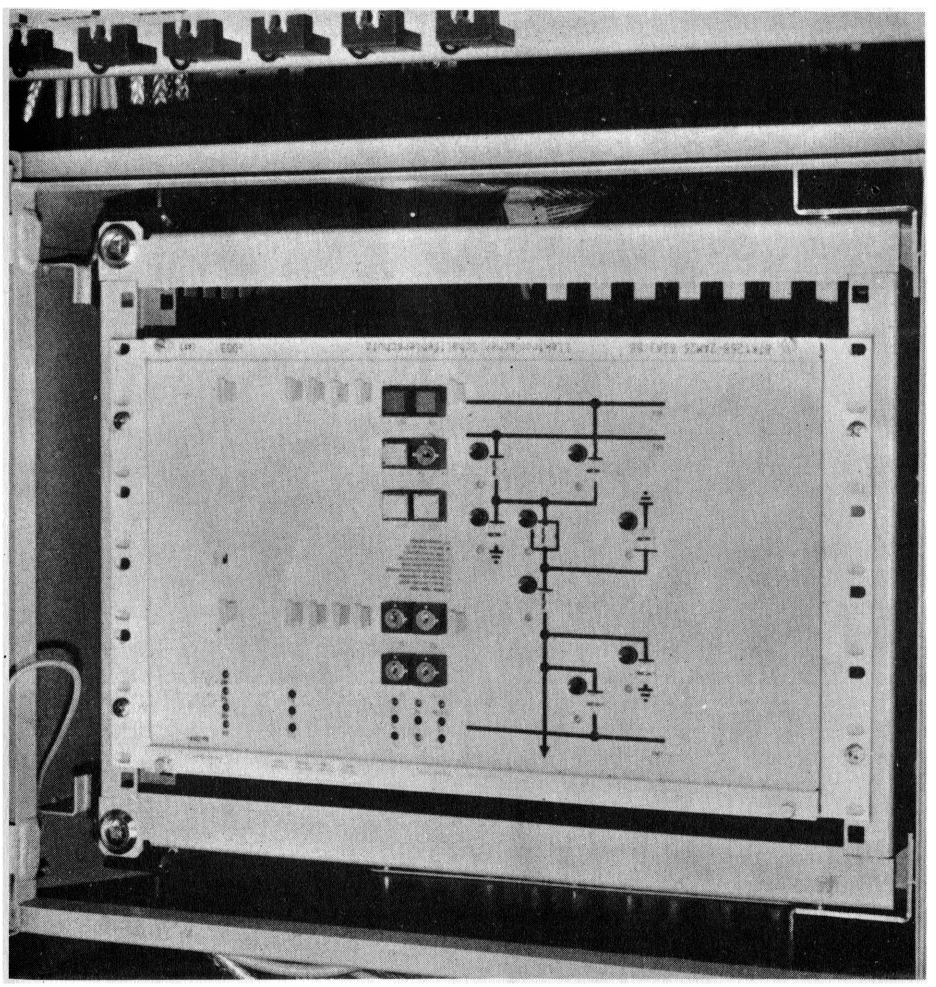


**Bild 3b.** Elektronisches Schaltfehlerschutzgerät

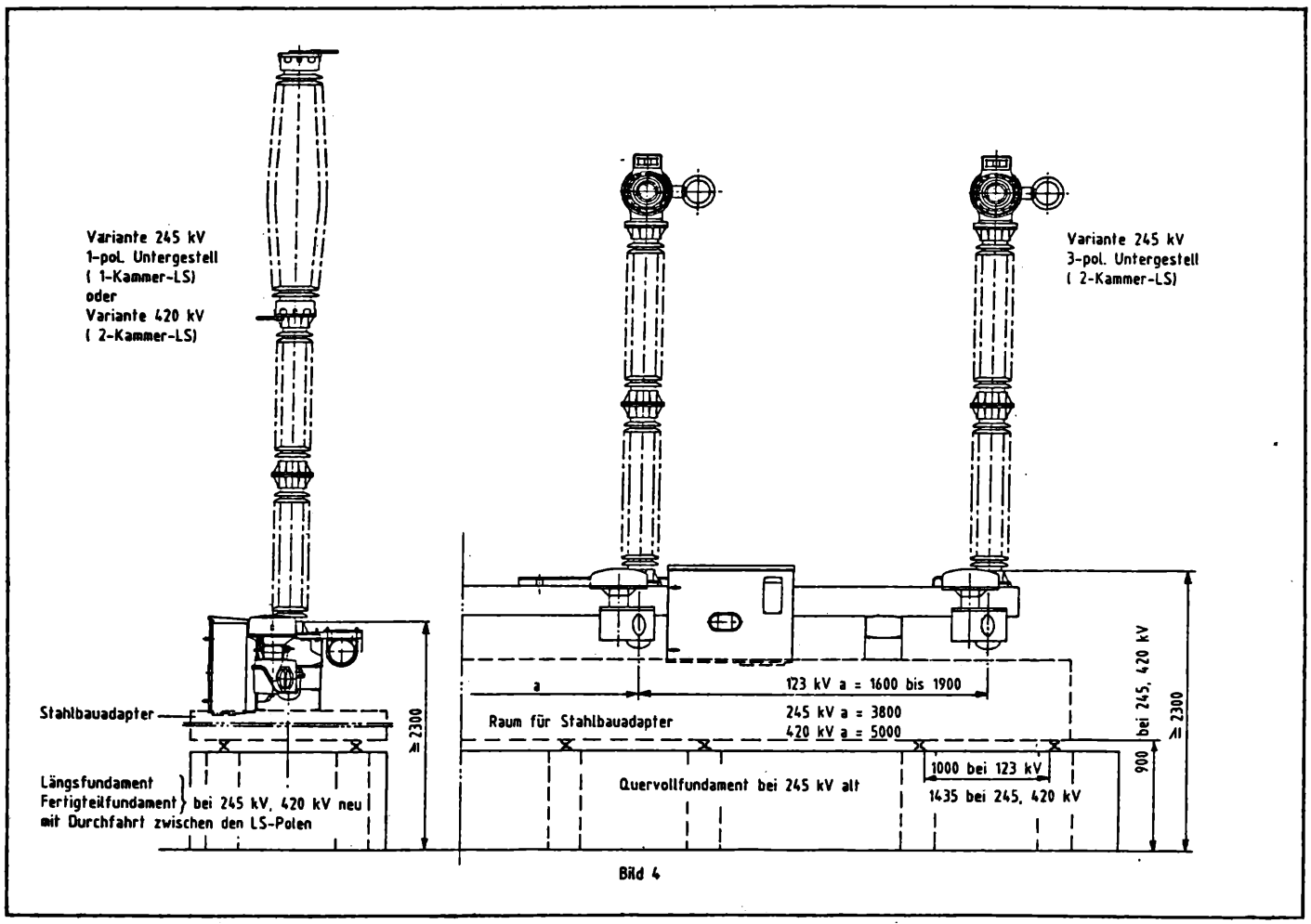
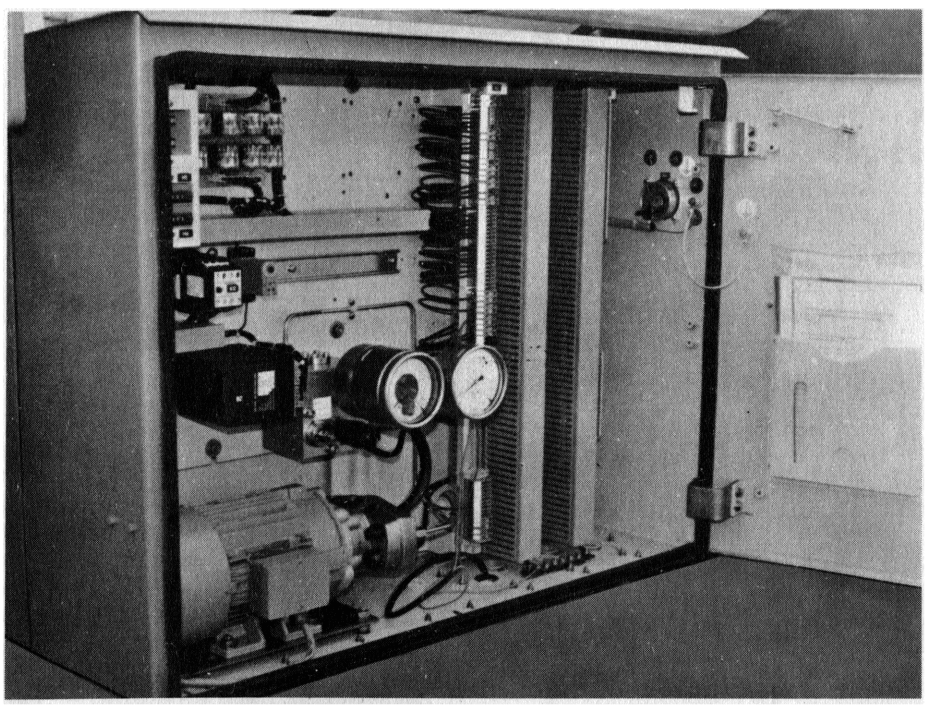



**Bild 4.** Stahlbau-Adapter für $SF_6$-Leistungsschalter zum Aufbau auf vorhandene Fundamente

**Bild 5.** Niederspannungssteuerung für $SF_6$-Leistungsschalter



gespannte Sammelschienenbelegung untersucht werden. Eine Zusatzabspannung der Sammelschienenseile war nicht erforderlich.

*2.2.3. Niederspannungssteuerung*

Die Motorantriebe erfordern eine sichere Gleichstromversorgung (Ringleitung). Die elektrische Steuerung muß die Umsetzung der elektrischen Ein- und Aus-Kommandos und die Verriegelungstechnik enthalten. Die meisten Hersteller von Trennschaltern bieten ein paßfähiges Steuerungssystem als Baustein an (Schaltfehlerschutzgerät).

Für die Dauerbeheizung der Motorantriebe ist eine sichere Drehstromversorgung notwendig (Ringleitung).

## 3. Realisierung des Schaltgerätewechsels

### 3.1. Leistungsschalter

*3.1.1. Demontage*

– Entfernen der Hochspannungsseilverbindungen, Steuerkabelanschlüsse, Steuerkabel, Erdungsverbindungen, Niederspannungssteuerung

- Demontage und Abtransport der Baugruppen des Druckluft-Leistungsschalters
- Sanierung oder Abbruch der Fundamente

*3.1.2. Montage*
- Aufbau des Stahlbau-Adapters und Aufbringen des Korrosionsschutzes
- Montage der $SF_6$-Leistungsschalter-Unterkonstruktion
- Vorbehandlung der Erdisolatoren, Flansche
- Montage der Erdisolatoren, Schaltstangen, Schaltkammern einschl. Kuppeln der Schaltstangen, des Steuerschrankes bzw. Einbau der Niederspannungssteuerung, Hochspannungsseilanschlüsse, Steuerkabel, Erdungsverbindungen, Steuerkabelverbindungen am Leistungsschalter und im Steuerschrank.

*3.1.3. Herstellen der Funktionsbereitschaft*
- Evakuierung der Leistungsschalter-Innenräume, die zeitweilig atmosphärischen Einflüssen ausgesetzt waren, zur Trocknung bis zu einem Enddruck von $\leqq 3$ mbar
- $SF_6$-Füllung aus Flasche oder Servicegerät bis auf Nenndruck unter Beachtung der am Leistungsschalter gemessenen Temperatur; während des Druckanstieges Ansprechwerte der Öldruckwächter bzw. der Federwegschalter feststellen.

*3.1.4. Endprüfung*

3.1.4.1. Funktionsprüfung der Niederspannungssteuerung
- „Ein" und „Aus" von Warte, Steuerschrank, Niederspannungssteuerung
- Pumpverhinderung
- Polgleichlauf im 1. und 2. Aus-Kreis
- Wirksamkeit der $SF_6$-, Öl-, Druckluft-Sperren
- Nachweis der Meldungen von $SF_6$-Dichtewächtern, Öldruckwächtern, Druckluft-Manometern, Federwegschaltern

3.1.4.2. Funktionsprüfung der Motorsteuerung
- Kontrolle Motoranlauf, Absteuerung mit Einstellwerten
- Motoranlaufzeitstaffelung
- Motorschutzschalter.

3.1.4.3. Nachweis $SF_6$-Qualität
- Messung Taupunkt (absoluter Feuchtegehalt)
- Messung Luftanteil im $SF_6$
- Kontrolle der $SF_6$-Dichtheit mittels Lecksuchgerät.

3.1.4.4. Schaltereigenzeit
- Messung der Ein- und Ausschaltzeiten der Leistungsschalter-Pole und der Hilfsschalterzeiten.

3.1.4.5. Schalterendprüfprotokoll
Nachweis der Schalterendprüfung für Betreiber und Hersteller.

### 3.2. Trennschalter

*3.2.1. Demontage*
- Entfernen der Hochspannungsseilverbindung; dabei Aufhängen der Sammelschienenseile zur Vermeidung des Schneidens oder der Stückelung
- Demontage der Trennschalter, Erdungsschalter, Druckluft-Steuerrohre des Druckluftsteuergerätes aus dem Steuerschrank einschl. der elektrischen Steuerkabelanschlüsse.

*3.2.2. Montage*
- Aufbau des Stahlbau-Adapters und Aufbringen des Korrosionsschutzes
- Anbau der Motorantriebe an die Stahlunterkonstruktion
- Montage der Trennschalter-Stahlunterkonstruktion auf die Betonrammpfähle mit Stahlbau-Adapter
- Montage der Stützer, Drehisolatoren, Trennerköpfe mit Strombahnen, Einschlagkontakte, Anschlußwinkel für Hochspannungsseilanschlüsse, Erdungsschalter
- Montage der Hochspannungsseile
- Verlegung der Steuerkabel und Anschluß an jeden Trennschalterpol
- Montage des Schaltfehlerschutzgerätes einschl. Steuerkabelanschluß im Steuerschrank
- Montage der Erdungsanschlüsse.

*3.2.3. Endprüfung*
- Öffnen und Schließen der Trenn- und Erdungsschalter und Kontrolle der Endstellungen und richtigen Rückmeldungen bei Betätigung am Schaltfehlerschutzgerät und in der Schaltwarte
- Kontrolle aller Störmeldungen
- Funktion des Schaltfehlerschutzes.

## 4. Ausblick

Im kommenden Jahrzehnt wird versucht werden, alle Druckluft-Leistungsschalter und druckluftangetriebenen Trenn- und Erdungsschalter von 123 bis 420 kV durch $SF_6$-Leistungsschalter bzw. motorgetriebene Trenn- und Erdungsschalter zu ersetzen, um die Betriebssicherheit der Schaltfelder entscheidend zu erhöhen.
Durch intensive Arbeit bei der Vorbereitung der Stahlbau-Adapter, Vereinheitlichung der Niederspannungssteuerung und des Schaltfehlerschutzgerätes können der Arbeitsaufwand im Schaltfeld sowie die Kosten gesenkt werden.

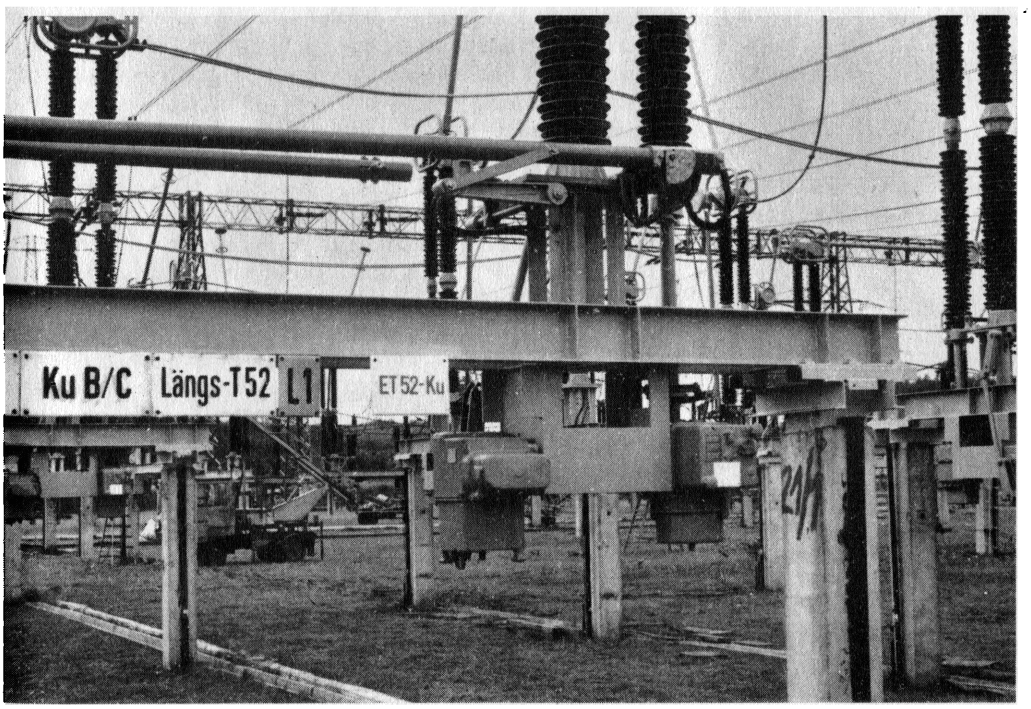



**Bild 6.** Stahlbaukonstruktion zur Anpassung von Trennschaltern mit Motorantrieb an die vorhandenen Fundamente

# Zur Dimensionierung von Isolatoren für Hochspannungsgeräte unter Fremdschichteinfluß

**J. Pilling, Zittau; E. Kynast, Berlin; L. Berndt, Zittau**

## 1. Problem

Das Isoliervermögen der Isolierungen von Hochspannungsgeräten wird für den überwiegenden Teil der im Betrieb auftretenden Beanspruchungen in standardisierten Prüfungen nachgewiesen. Dazu gehören die Beanspruchungen durch Blitz- und Schaltüberspannungen, Wechselspannungen mit Betriebsfrequenz sowie die Belastung durch Regen. Bezüglich einer Belastung durch leitfähige Fremdschichten werden in den entsprechenden Standards vorwiegend geometrische Größen oder daraus gebildete Faktoren, z. B. Kriechüberschlagstrecke, Profilfaktor [1] vorgeschrieben. Ein experimenteller Nachweis des Isoliervermögens bei Fremdschichtbelastung wird zwar empfohlen, aber nicht vorgeschrieben. Wegen des hohen Prüfaufwandes und der recht komplizierten, mit zahlreichen Meßunsicherheiten behafteten Prüfverfahren werden die Isolierungen überwiegend entsprechend der standardisierten Kriechüberschlagstrecke dimensioniert.

Wegen erheblicher Fremdschichtbelastungen auf dem Gebiet der DDR haben die Energieversorgungsunternehmen dieses Landes konsequent versucht, dem experimentellen Nachweis des Fremdschicht-Isoliervermögens den Vorzug zu geben. Für Freileitungsisolatoren (Langstabilisatoren) liegen die Fremdschichtüberschlagskennlinien $U^F_{stw} = f(\kappa_s)$ vollständig und reproduzierbar vor [2]. Sie können durch folgende Gleichung approximiert werden:

$$U^F_{stw} = 2{,}6 \cdot \ddot{u}_k \cdot k_s \cdot \kappa_s^{-0{,}33} \cdot D^{-0{,}38} \qquad (1)$$

$U^F_{stw}$ Fremdschichtstehwechselspannung in kV (Überschlagwahrscheinlichkeit 10 %)
$\ddot{u}_k$ Kriechüberschlagstrecke in cm
$k_s$ Ausnutzungsgrad der Kriechüberschlagstrecke (Bild 1)
$\kappa_s$ Schichtleitfähigkeit in $\mu$S
$D$ Strunkdurchmesser in cm

Die konsequente Anwendung dieses Prinzips für Geräteisolierungen wirft einige Probleme auf, über die im folgenden berichtet werden soll.

## 2. Durchmesser der Isolatoren

Da der Oberflächenleitwert dem Durchmesser $D$ des Isolators proportional ist, verringert sich die Fremdschichtüberschlagspannung mit zunehmendem Durchmesser. Dafür ist ein empirischer Zusammenhang für einen weiten Bereich technisch relevanter Isolatorabmessungen ermittelt worden [3].

$$U^F_{stw} \sim D^{-0{,}38} \qquad \text{für } \kappa_s = \text{const.} \qquad (2)$$

Würde man diesem Zusammenhang bei der Dimensionierung folgen, müßte die Kriechüberschlagstrecke mit zunehmendem Isolatordurchmesser für eine bestimmte Schichtleitfähigkeit wesentlich, entsprechend

$$\ddot{u}_k \sim D^{+0{,}38} \qquad (3)$$

vergrößert werden (z. B. für eine Verdreifachung des Durchmessers um 52 %). IEC 815 [1] schreibt dagegen bei einer Vergrößerung des Durchmessers von 100 mm auf 300 mm eine Erhöhung um 10 % vor. Dies wird damit begründet, daß Isolatoren mit großem Durchmesser im Betrieb am Umfang ungleichmäßig verschmutzen. Überwiegend bildet sich bei vertikal angeordneten Isolatoren an der der Hauptwindrichtung abgewandten Seite ein stark verschmutzter Streifen [4]. Es kann näherungsweise davon ausgegangen werden, daß die abgelagerte Schmutzmenge und damit der auf die Kriechüberschlagstrecke bezogene Leitwert der Fremdschicht in den technisch relevanten Grenzen unabhängig vom Isolatordurchmesser ist. In den bekannten Prüfvorschriften [5] [6] sind dagegen nur Verfahren enthalten, bei denen der Isolator am Umfang mehr oder weniger gleichmäßig verschmutzt wird. Zum Ausgleich werden deshalb für Isolatoren mit großem Durchmesser reduzierte Nennsteh-Schichtleitfähigkeiten festgelegt. Die einzustellende Nennsteh-Schichtleitfähigkeit $\kappa_{snst}$ errechnet sich wie folgt [9]:

$$\kappa_{snst} = \kappa_{snsto} \cdot D_o/D \qquad (4)$$

$\kappa_{snsto}$ Nennstehschichtleitfähigkeit für „dünne" Isolatoren. ($D_o = 75$ mm)

Für Isolatoren mit konstantem Strunkdurchmesser besteht damit eine Lösung für den experimentellen Nachweis des Isoliervermögens.

Häufig werden aber in Geräten Isolatoren oder Isolatorkombinationen mit kontinuierlichen oder abgestuft sich änderndem Strunkdurchmesser eingesetzt. Im Sinne der oben genannten Annahme müßte bei der Prüfung entsprechend Gl. (4) eine sich entlang der Kriechüberschlagstrecke ändernde Schichtleitfähigkeit aufgebracht werden. In diesem Fall würde man nach dem Zuschalten der Spannung auch an konischen oder tonnenförmigen Isolatoren (z. B. Stützer oder Schaltkammerporzellane) eine lineare Spannungsverteilung über alle Schirmteilungen (makroskopische Spannungsverteilung) erhalten. Nur innerhalb der Schirmteilungen ist die Spannungsverteilung nichtlinear. Da dieses Vorgehen prüftechnisch wiederum kaum realisierbar ist, wurde festgelegt, den Isolator gleichmäßig mit der Nennstehschichtleitfähigkeit für den maximalen Strunkdurchmesser zu verschmutzen. Dies führt aber beim Zuschalten der Spannung zu einer auch makroskopisch ungleichmäßigen Spannungsverteilung. Die Vorlichtbögen zünden in den Strunkabschnitten mit geringem Strunkdurchmesser. Es kann zur Vereinigung mehrerer Vorlichtbögen kommen, die eine Verkürzung der wirksamen Kriechüberschlagstrecke (Gl. (1), Verringerung von $k_s$) und damit eine Verringerung der Fremdschichtüberschlagspannung bewirken. Da der Grad der Überbrückung mit zunehmender Schichtleitfähigkeit ebenfalls steigt, weist die Fremdschichtüberschlagskennlinie einen steileren Abfall auf. Dieser Sachverhalt soll am Beispiel eines geprüften Schaltkammerüberwurfes mit „tonnenartiger" Form erläutert werden (Bild 2). Für dieses Porzellan ergab sich bei gleichmäßiger Verschmutzung ein Wert von $n_K = 0{,}53$ (Kurve 1, kreisförmige Symbole). Im Bereich bis etwa 40 $\mu$S bestätigen die Meßergebnisse die nach Gl. (1) berechnete Kennlinie (Kurve 2) recht gut. Dagegen treten bei großen Schichtleitfähigkeiten erhebliche Abweichungen, d. h. Überschläge weit unterhalb der berechneten Kennlinien auf, die ihre Ursache in der oben erwähnten schlechter werdenden Kriechwegausnutzung haben. Bringt man dagegen an dem Isolator einen streifenförmigen Belag in einer Breite von 300 mm (gemessen am Strunk, entspricht etwa $D = 100$ mm) an, so ist die makroskopische Spannungsverteilung linear. Damit sind die Vorlichtbögen auf alle Schirmteilungen gleichmäßig verteilt (Bild 3). Eine Vereinigung und damit Verkürzung der Kriechüberschlagstrecke tritt erst unmittelbar beim Überschlag auf. Das Ergebnis ist eine wesentliche Erhöhung der Fremdschichtüberschlagspannung bei gleicher Schichtleitfähigkeit sowie eine gute Übereinstimmung mit der berechneten Kennlinie nach Gl. (1) (Kurve 3, quadratische Sym-

Prof. Dr. sc. techn. *Jürgen Pilling* ist Inhaber des Lehrstuhls Hochspannungstechnik, Dr.-Ing. *Lothar Berndt* wissenschaftlicher Oberassistent an der Fakultät Elektrotechnik der Technischen Hochschule Zittau. Dipl.-Ing. *Edelhard Kynast* ist Versuchsfeldingenieur bei der Siemens AG, Schaltwerk Hochspannung Berlin.

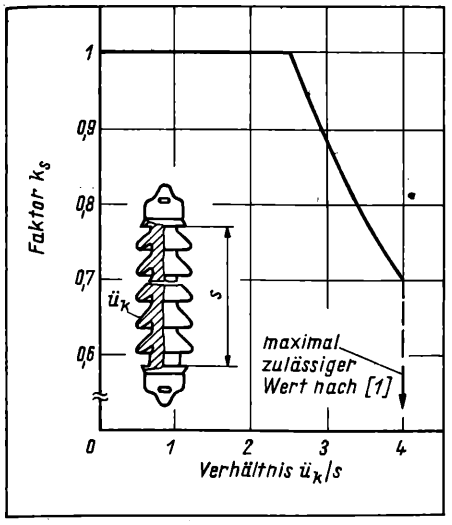



**Bild 1.** Ausnutzungsgrad der Kriechüberschlagstrecke $k_s$ in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Kriechüberschlagstrecke $\ddot{u}_k$ zur Schlagweite $s$ nach [9]

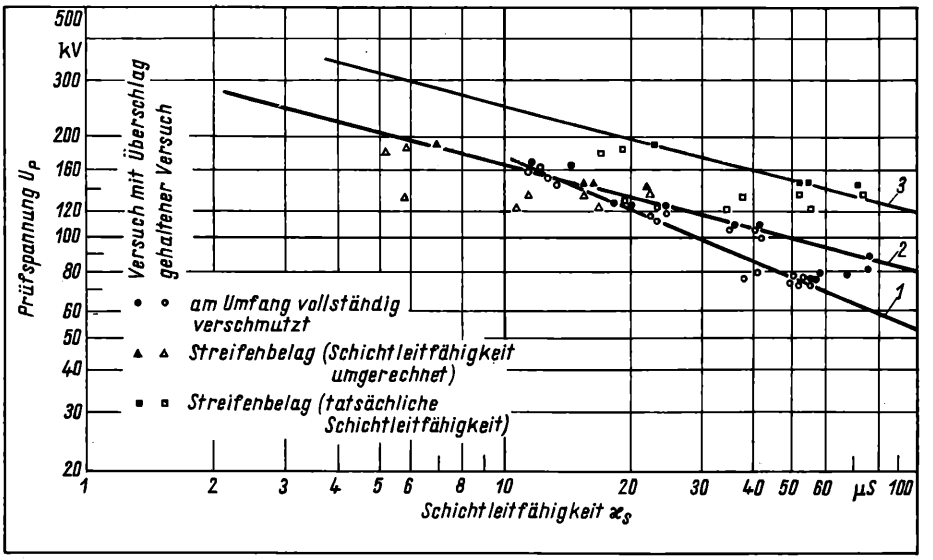
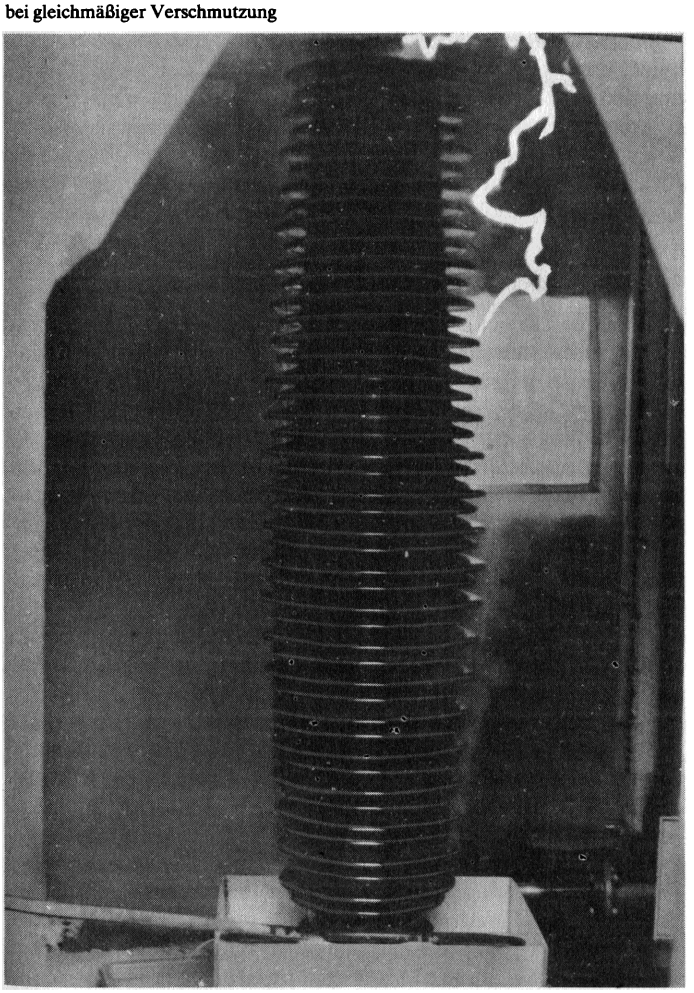


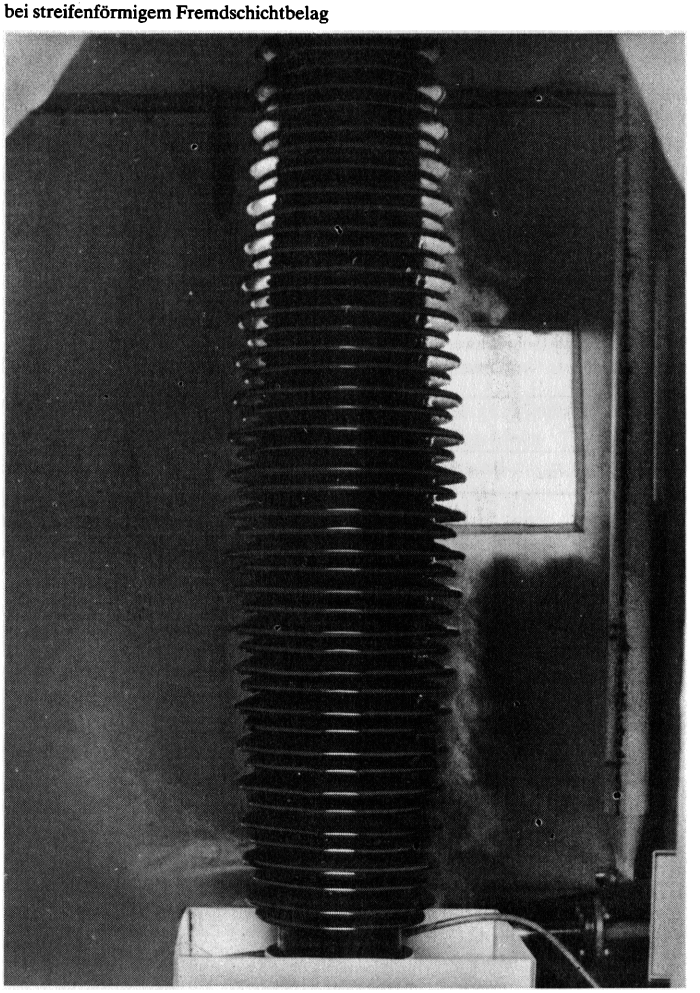

**Bild 2.** Ergebnisse der Fremdschichtprüfung und berechnete Fremdschichtüberschlagskennlinie eines Porzellans mit „tonnenartiger" Form
Kurve 1 gemessene Fremdschichtüberschlagskennlinie
$U^F_{stw} = f(\kappa_s)$ bei vollständiger Verschmutzung am Umfang
Kurve 2 berechnete Fremdschichtüberschlagskennlinie
$U^F_{stw} = f(\kappa_s)$ nach Gl. (1) mit $k_s = 0{,}8$
Kurve 3 berechnete Fremdschichtüberschlagskennlinie $U^F_{stw} = f(k_s)$
für Streifenbelag ($b_{Streifen} \approx 300$ mm – gemessen am Strunk)

bole) auch für große Schichtleitfähigkeiten. Zum besseren Vergleich mit den Ergebnissen bei Verschmutzung am gesamten Isolatorumfang wurden die Schichtleitfähigkeiten der Meßpunkte bei Streifenbelag entsprechend Gl. (4) umgerechnet (dreieckige Symbole). Man erkennt, daß kein Meßpunkt „Überschlag" unterhalb von Kurve 2 liegt. Aus dem erläuterten Beispiel folgt, daß der experimentelle Nachweis des Isoliervermögens von Isolatoren mit kontinuierlicher oder stufenförmiger Änderung des Strunkdurchmessers unter Umständen zu pessimistische Werte liefert, natürlich unter der Voraussetzung, daß der Grad der Verschmutzung im Betrieb unabhängig vom Strunkdurchmesser ist, wie es Gl. (4) und damit der Strategie des Standards entspricht. Für diese Isolatoren liefert die Bemessung nach der Kriechüberschlagstrecke unter Berücksichtigung des Faktors $k_s$ nach Bild 1 die realistischere Lösung.

**Bild 3.** Einsatz von Vorlichtbögen an einem „tonnenförmigen" Porzellan
bei gleichmäßiger Verschmutzung



bei streifenförmigem Fremdschichtbelag



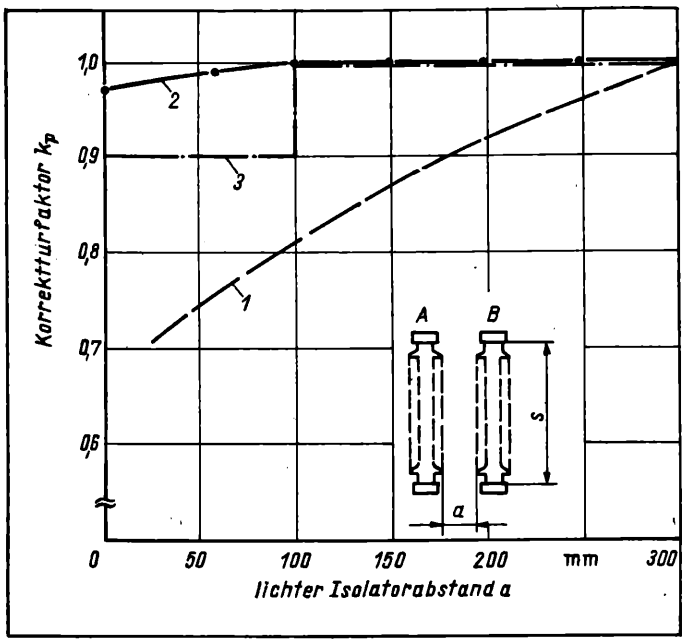



**Bild 4.** Korrekturfaktor $k_p$ für die Verringerung der Fremdschicht-Stehwechselspannung bei parallelen Isolatoren
Kurve 1 nach *Streubel* [8]
Kurve 2 eigene Meßergebnisse (zwei Langstabisolatoren LF 75/16 parallel)
Kurve 3 neuer Vorschlag für $k_p$ (entspricht einer 10 %igen Erhöhung der Mindestkriechüberschlagstrecke für parallele Isolatoren mit $a \leqq 0{,}1\,s$

Überlegenswert ist jedoch die Einführung einer Fremdschichtprüfung mit streifenförmigem – nicht sektorförmigem – Belag. Dies ist mit dem Flow-on-Verfahren [7] und mit dem Solid-layer-Verfahren [5] [6] realisierbar.

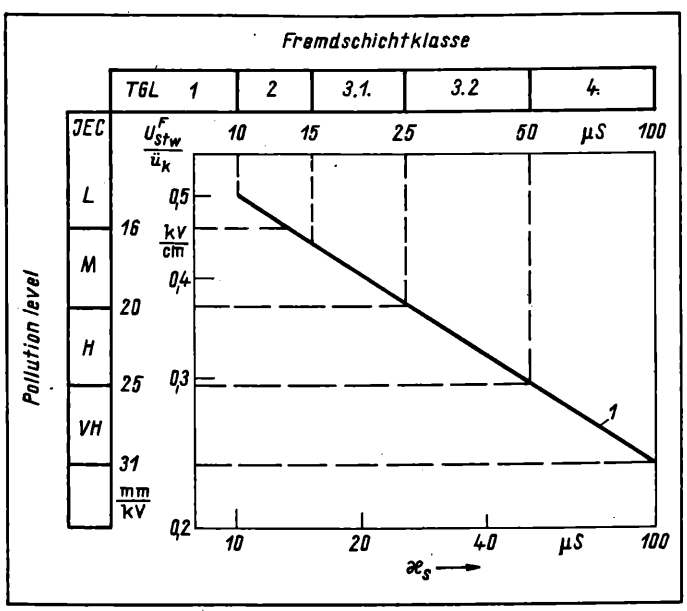
## 3. Abstand zwischen parallelen Isolatoren

Bei der Gestaltung von Hochspannungsgeräten ist es auch oft erforderlich, 2 Isolatoren in geringem Abstand nebeneinander anzuordnen (z. B. Steuerkondensator parallel zur Schaltkammer von Leistungsschaltern, Schubisolator parallel zum Stützer von Trennern). Es ist sowohl im Betrieb als auch bei Experimenten im Labor beobachtet worden, daß sich das Isoliervermögen von parallelen Isolatoren unter Fremdschichtbelastung mit abnehmendem Abstand zwischen den Isolatoren verringert (Bild 4, Kurve 1). Dieses Verhalten wird ebenfalls durch Ungleichmäßigkeiten der makroskopischen Spannungsverteilung verursacht, die bei einigen Verschmutzungsverfahren auch im Labor nicht vermeidbar sind. Aus physikalischer Sicht ist ein Einfluß nur denkbar, wenn ein Lichtbogen den Zwischenraum überbrückt. Dies ist auf zwei Wegen möglich:

a) Die Ungleichmäßigkeit der Spannungsverteilung an einem oder an beiden Isolatoren führt zu einer Potentialdifferenz zwischen den Isolatoren, die einen Durchschlag bewirkt.
b) Die Ungleichmäßigkeit der Spannungsverteilung an einem Isolator bewirkt schirmüberbrückende Vorlichtbögen, die sich unterhalb der Überschlagspannung von der Isolatoroberfläche abheben und damit zufällig durch ihre Bewegung oder auch über einen Durchschlag die Oberfläche des anderen Isolators erreichen.

Damit wird der Strom im Vorlichtbogen sowohl durch die Restfremdschicht des Isolators *A* als auch die des Isolators *B* gespeist. Der damit größere Strom bewirkt die Absenkung der Überschlagspannung. Sie kann auch dadurch entstehen, daß die jeweils stark verschmutzten Teile der beiden Isolatoren über den Vorlichtbogen verbunden werden.
Zur Untersuchung dieses Einflusses wurden Versuche an parallelen Langstabisolatoren LF 75/16 durchgeführt. Zur Verschmutzung diente das Flow-on-Verfahren, das nachweislich besonders gleichmäßige Fremdschichten erzeugt (Bild 4, Kurve 2). Daher ist ein Einfluß wegen gelegentlicher Querdurchschläge erst für $a \leqq 100$ mm nachweisbar, der wesentlich geringer ist als in erwähnten Beispielen der Literatur.
Würde man für Isolierungen, bestehend aus parallelen Isolatoren, den experimentellen Nachweis des Isoliervermögens unter Fremdschichteinfluß fordern, würde das Ergebnis maßgeblich durch die zufälligen Ungleichmäßigkeiten der Fremdschicht im Labor beeinflußt. Außerdem müßten parallele Isolatoren mit unterschiedlichem Strunkdurchmesser nach Gl. (4) auch mit verschiedenen Schichtleitfähigkeiten verschmutzt werden. Daher ist es zweckmäßiger, das Isoliervermögen am einzelnen Isolator nachzuweisen und den in der Praxis nachgewiesenen, jedoch nicht genau quantifizierbaren Einfluß der Parallelität durch eine Verlängerung der Kriechüberschlagstrecke um 10 % (entspricht $k_p = 0{,}9$) zu berücksichtigen, wenn der Abstand zwischen den Isolatoren weniger als 10 % der Bauhöhe der Isolatoren beträgt (Bild 4, Kurve 3).

**Bild 5.** Vergleich der Fremdschichtklassen nach TGL 8678 [92] mit IEC 815 [1] (Pollution level)
L light (leicht)
M medium (mittel)
H heavy (schwer)
VH very heavy (sehr schwer)
1 berechnete Kennlinie nach Gl. (1) für „dünne" Isolatoren




## 4. Quantifizierung der Fremdschichtbelastung

IEC 815 beschreibt die Höhe der Fremdschichtbelastung verbal (leicht, mittel, schwer, sehr schwer). Der experimentelle Nachweis des Isoliervermögens sowie die belastungsgerechte Dimensionierung für einen bestimmten Standort setzen eine Quantifizierung der Belastungsgrenzen sowie eine Bestimmung der zu erwartenden Belastung am Standort voraus. Die Festlegungen zu den Belastungsgrenzen im nationalen Standard TGL 8678 [9] können denen des übergeordneten Standards IEC 815 anhand Gl. (1) gegenübergestellt werden (Bild 5). Auf der Basis einer statistisch gesicherten Bestimmung der Fremdschichtbelastung am Standort mit Hilfe einer dafür geeigneten Sonde [8] kann dann eine sichere Auswahl der Isolierungen erfolgen. Dabei ist für besondere Spannungsbelastungen, z. B. im Falle der Phasenopposition an Leistungsschaltern in den Abgängen von Generatoren, nicht der standardisierte, sondern der tatsächliche Wert der Spannungsbelastung zugrunde zu legen. Für diese extremen Spannungs- und Fremdschichtbelastungen sollte jedoch aus wirtschaftlichen Gründen ein Kompromiß unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Auftreten der beiden extremalen Belastungen sowie die bekannten prophylaktischen Maßnahmen zur Vermeidung eines Fremdschichtüberschlages gefunden werden, um eine Überdimensionierung der Kriechüberschlagstrecke und damit der Bauhöhe von Überwürfen für die Schaltkammern von Leistungsschaltern zu vermeiden.

## 5. Zusammenfassung

Der im internationalen Standard (IEC 815) empfohlene, aber nicht vorgeschriebene experimentelle Nachweis des Isoliervermögens von Isolatoren unter Fremdschichteinfluß ist für Freileitungsisolatoren mit gleichmäßiger Verschmutzung prüftechnisch gelöst und damit standardisierbar. Das Prüfergebnis wird dabei hauptsächlich durch den Ausnutzungsgrad der Kriechüberschlagstrecke der einzelnen Schirmteilung an Langstabisolatoren bzw. des einzelnen Kappenisolators beeinflußt und lenkt das Augenmerk des Konstrukteurs auf die Optimierung der Schirmform.
Für Geräteisolatoren sowie für komplette Isolierungen von Hochspannungsgeräten ist diese generelle Aussage nicht möglich. Prüftechnisch oder zufällig bedingte Ungleichmäßigkeiten der Spannungsverteilung, die nicht repräsentativ für die Verschmutzung unter Betriebsbedingungen sind, können zu einer erheblichen Absenkung der Überschlagspannung auf Grund der Verkürzung der Vorlichtbögen in Teilbereichen der Isolierung führen. Dies ist besonders bei Isolatoren mit konischem Strunk bzw. mit abgestuftem Durchmesser zu beachten. Eine Prüfung mit streifenförmigem Belag würde den realen Belastungen im Betrieb besser entsprechen und auch für Geräteisolierungen mit größerem Durchmesser den experimentellen Nachweis des Isoliervermögens unter Fremdschichtbelastung ermöglichen.
Auf der Basis vorliegender, statistisch gesicherter Fremdschichtüberschlagskennlinien für Langstabisolatoren kann eine Quantifizierung der in IEC 815 angegebenen Belastungsgrenzen für die Verschmutzung von Isolatoren erfolgen.

**Literatur**


[1] IEC 815: Richtlinie für die Auswahl von Isolatoren unter Verschmutzungsbedingungen (engl.). 1. Ausgabe 1986
[2] TGL 200-6046, Ausg. 02/82: Elektrische Isolatoren, Langstabisolatoren mit Pfannenkappen, Hauptkennwerte
[3] *Streubel, H.*: Die Fremdschichtüberschlagspannung von Isolatoren mit unterschiedlichem Durchmesser. Hermsdorfer Technische Mitteilungen. 23 (1983) 63, S. 2005–2007
[4] *Böhme, H.; Zeh, H.*: Schmutzablagerung durch Wind an Isolatoren. ELEKTRIE Berlin 21 (1967) 7, S. 239–240
[5] IEC 507: Künstliche Fremdschichtprüfungen an Hochspannungsisolatoren für Wechselspannungsanlagen (engl.). 1. Ausgabe 1975
[6] DIN-VDE 0448: Prüfung von Isolatoren für Betriebs-Wechselspannung über 1 kV unter Fremdschichteinfluß.
Teil 1: Prüfverfahren mit haftenden Fremdschichten (Kieselgur-Prüfverfahren). Ausg. 10.75
Teil 2: Prüfverfahren mit fließenden Fremdschichten (Salz-Nebel-Prüfverfahren). Ausg. 09.77
[7] *Macchiaroli, B.; Turner, J. A.*: A new contamination test method. IEEE Trans. PAS-88 (1969), S. 1410–1411
[8] *Streubel, H.*: Zur Berechnung von Fremdschicht-Stehwechselspannungen. Hermsdorfer Technische Mitteilungen 26 (1986) 70, S. 2237–2242
[9] TGL 8678: Freiluftisolierungen unter Fremdschichteinfluß in elektrotechnischen Anlagen über 1 kV Wechselspannung.
Blatt 01: Termini und Definitionen
Blatt 02: Starkstromfreileitungen und Fahrleitungen
Blatt 03: Elektrotechnische Betriebsmittel
Blatt 04: Bestimmung der Schichtleitfähigkeit für Sedimentationsstaubfremdschichten
[10] *Bärsch, R.; Pilling, J.*: Zur Messung der Schichtleitfähigkeit natürlich verschmutzter Isolatoren. ELEKTRIE 36 (1981) 1, S. 37–39


EA 6227

# Einfluß von stromstarken Vorentladungen auf Kittsysteme von Freiluftisolatoren

**H. Ambrosch, Dresden; D. Gorgius, Zittau**

In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Untersuchungen zum Betriebsverhalten elektrotechnischer Betriebsmittel unter erhöhten Umweltbelastungen durchgeführt. Besonders die an Freiluftisolierungen in Verbindung mit Feuchtigkeitsablagerungen auftretenden elektrolytisch-leitfähigen Fremdschichten stellen oft eine akute Gefährdung für eine sichere Betriebsführung dar [1]. Ehe es zum sogenannten Fremdschichtüberschlag kommt, können stromstarke und z. T. relativ stabile Vorentladungen auftreten. Da es durch die Wirkung derartiger Vorentladungen an Standorten mit extrem hoher Umweltbelastung zu Erosionserscheinungen und zu Störungen an Kittsystemen von Isolieranordungen gekommen ist, wurde diese Problematik durch Laborversuche, über die in diesem Beitrag auszugsweise berichtet wird, näher untersucht.

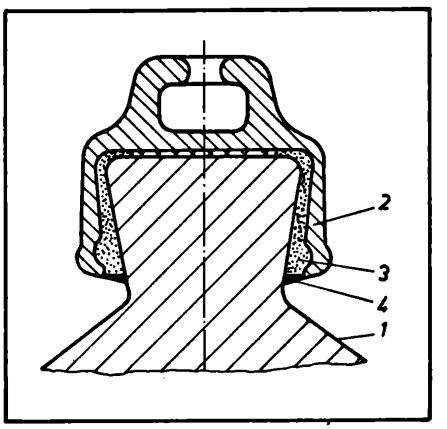



**Bild 1.** Armierung beim Langstabisolator
1 – Porzellan
2 – Armatur
3 – Kitt
4 – Abdeckung

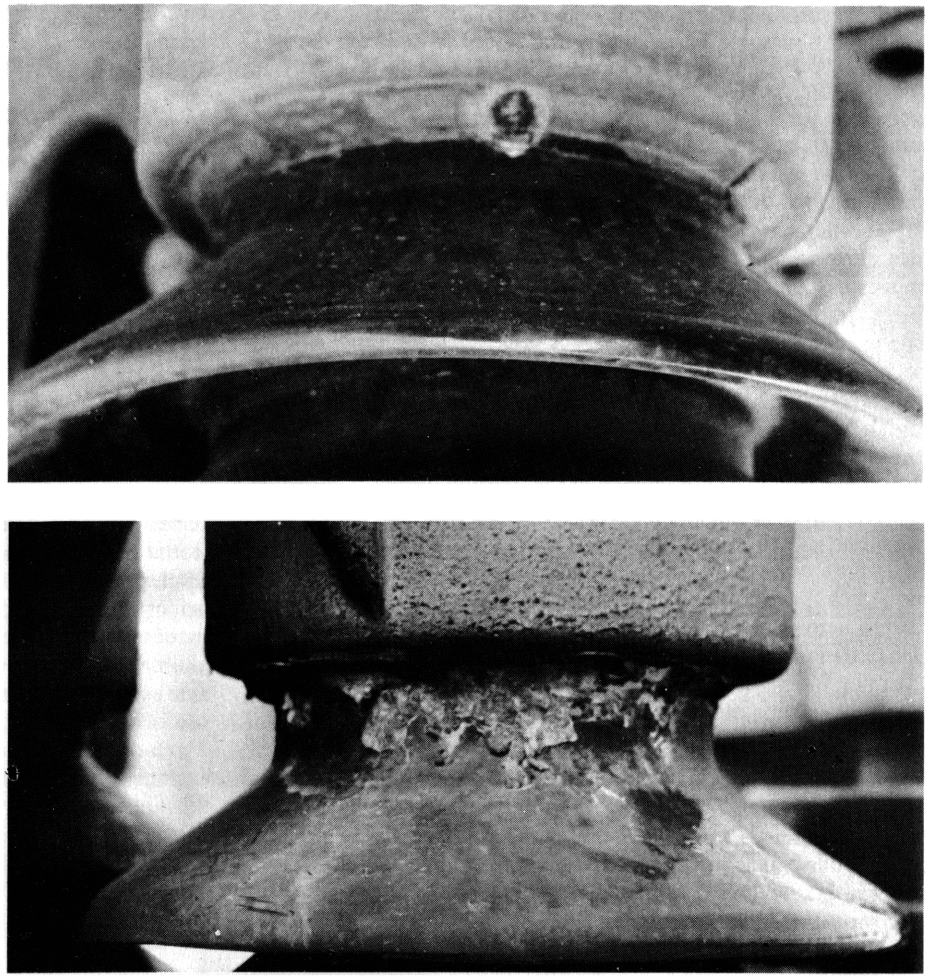
## 1. Aufbau und Aufgabe der Kittsysteme

Die bei Isolatoren erforderliche kraftschlüssige Verbindung Armatur–Isolierkörper wird meist durch Einfüllen eines „Kittes" realisiert (Bild 1). Die Kittung hat mechanische und elektrische Aufgaben zu erfüllen:
Mechanisch:
- Zwei Materialien (Metallarmatur, Keramikisolierkörper) mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten dauerhaft verbinden
- Fertigungsbedingte Maßtoleranzen, insbesondere der Isolierkörper, ausgleichen.
- Kraftfluß von der Armatur zum Isolierkörper gleichmäßig verteilen.

Elektrisch:
- Luftspalte zwischen Isolierkörper und Armatur vermeiden
- Stellen hoher elektrischer Feldstärke am Armaturenrand ausschließen.

Prof. Dr. sc. techn. *Helmut Ambrosch* ist ordentlicher Professor an der Fakultät Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden. Dozent Dr.-Ing. *Dietmar Gorgius* ist Hochschuldozent an der Fakultät Elektrotechnik der Technischen Hochschule Zittau.

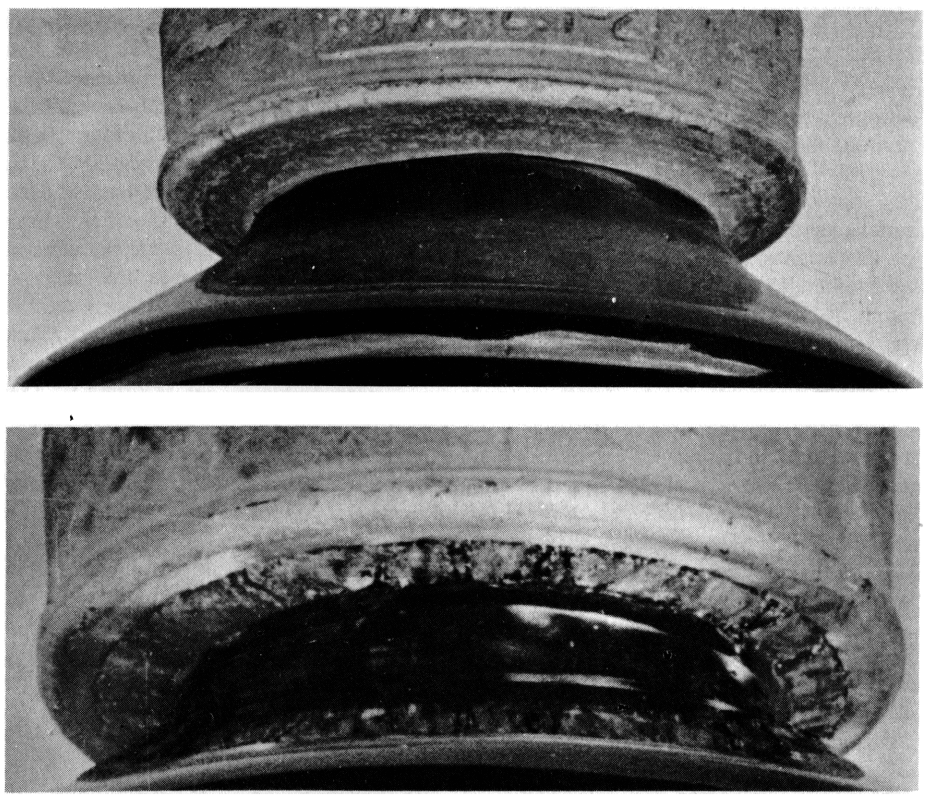
**Bild 2.** Kittfugen an Gerätestützer in einem Umspannwerk
a) im Anfangsstudium der Schädigung;
b) im fortgeschrittenen Stadium der Schädigung



a)

b)

**Bild 3.** Portlandzementkittung
a) im Neuzustand;
b) nach 60 min Summenbeanspruchung durch Vorlichtbögen mit Ableitströmen von 100...200 mA



a)

b)

Dabei muß das Verhalten des Kittsystems nicht nur im Bereich normaler Umgebungs- und Betriebstemperaturen stabil sein, sondern auch der Einwirkung elektrischer Entladungen standhalten. Während die Erfüllung der mechanischen Aufgaben schon von jeher im Mittelpunkt der Betrachungen und Prüfungen steht [2], wurden die elektrischen Aufgaben bei einem sorgfältigen stoffschlüssigen Einfüllen des Kittmediums allgemein als erfüllt angesehen. Als Kittmaterialien werden hauptsächlich Schwefelzement oder Portlandzement, seltener Blei-Antimon verwendet. Zementkittungen können elektrisch als zum Isolierkörper gehörend betrachtet werden. Der Oberflächenbeschaffenheit der Kittfugen muß besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Selbst bei

sorgfältigster Herstellung bleibt die Oberfläche einer Zementkittung relativ porös und erreicht ungeschützt nicht die Güte der Glasur eines Porzellanisolators. Dem Eindringen von Feuchtigkeit wird z. T. durch einen Anstrich begegnet, der, wenn er wirksam bleiben soll, regelmäßig erneuert werden muß.
Vorwiegend aus technologischen Gründen wird häufig Schwefelzement als Kittmaterial angewendet. Der auf etwa 140 °C erhitzte Schwefelzement (auch als Schmelzzement bezeichnet) ist gießfähig und erfüllt nach Erstarren im allgemeinen die o. g. Aufgaben, wobei die mechanische Festigkeit bei einer zugbeanspruchten Konusarmierung sogar etwa 15 % höher ist als bei einer Portlandzementierung. Außerdem werden bedingt durch ein vergleichsweise geringeres Elastizitätsmodul örtliche Spannungsspitzen an der Einspannstelle besser ausgeglichen. Nach dem Temperatur-Dehnungs-Diagramm beginnt die Erweichung bei Temperaturen > 80 °C, so daß für die klimatischen Bedingungen in Mitteleuropa – vor allem unter Berücksichtigung der genannten Vorteile – die Anwendung von Schwefelzement bei der Armierung von Isolatoren gerechtfertigt ist, wie auch langjährige positive Betriebserfahrungen bestätigen [3]. An Standorten mit extremer Umweltbelastung (z. B. durch salzhaltige Fremdschichten in unmittelbarer Meeresnähe) kommt es bei Auftreten von stromstarken Vorentladungen zu Erosionserscheinungen, Ausschmelzungen und sogar zum Ausbrennen der Schwefelzementkittung, so daß letztlich auch die mechanische Festigkeit der Isolieranordnung nicht mehr gegeben ist. Bild 2 zeigt den oberen Teil eines Geräteisolators in einem Umspannwerk mit beginnender Erosion bzw. mit starken Ausschmelzungen an der Schwefelzementkittung. Diese, unter bestimmten Bedingungen unbefriedigende Beständigkeit von Schwefelzementkittungen gegenüber stromstarken Vorentladungen war der Anlaß zu Untersuchungen mit der Zielstellung

- Nachbildung der Phänomene im Labor
- Test von verschiedenen Kittsystemen
- Test von verschiedenen Abdeckungen auf Kittfugen.

## 2. Entstehung der Vorentladungen

Da die Fuge von Zementkittungen als Teil der Isolierkörperoberfläche betrachtet werden muß, können an ihr – genau wie an anderen Stellen entlang der Isolatoroberfläche – entsprechend dem bekannten Fremdschichtüberschlagsmodell [4] Vorlichtbögen entstehen. Solche Vorlichtbögen treten immer dann auf, wenn es auf der Oberfläche eines Isolators mit einer elektrolytisch-leitfähigen Fremdschicht zur Ausbildung einer Trockenzone kommt. Derartige Trockenzonen entstehen vor allem an Stellen, die gegenüber Feuchtigkeitsablagerungen relativ geschützt sind, oder durch Verdampfung bei hohen Ableitströmen (> 100 mA). Die obere Kittfuge von Isolieranordnungen ist diesbezüglich besonders gefährdet, zumal an dieser Stelle naturgemäß auch die höchste Spannungsbeanspruchung auftritt. Da über den Trockenzonen der längenbezogene Spannungsabfall besonders hoch ist, kann dort eine stromstarke Teilentladung (Vorlichtbogen) gezündet werden. Entsprechend der sich einstellenden Spannungs- und Feldstärkeverteilung kann der Vorlichtbogen relativ stabil brennen, er kann sich durch Fußpunktwanderung verlängern oder auch wieder verlöschen. Brennt ein derartiger Vorlichtbogen über einer Kittfuge aus Schwefelzement, kommt es bereits nach kurzer Einwirkdauer aufgrund der thermischen Wirkungen zu Erosionserscheinungen und bei längerer Einwirkung zum Ausschmelzen. Die im praktischen Netzbetrieb aufgetretenen starken Ausschmelzungen sind vermutlich durch wiederholte Vorlichtbogeneinwirkung bzw. nach Entflammung des Schwefelzements verursacht worden.
Entsprechend dieser Modellvorstellung wurden bei den Laborversuchen Probeisolatoren (H 1467 bzw. StV 20) künstlich verschmutzt (Zelleim mit Salzzusatz) und im feuchten Zustand elektrisch beansprucht. Da die Kittfuge bewußt nicht verschmutzt wurde, um die Trockenzone genau an dieser Stelle nachzubilden, traten bei Spannungssteigerung Vorentladungen über die Kittfuge auf. Durch Spannungsregelung konnte ein Ableitstrom von 100 mA bzw. 200 mA eingestellt werden. Die Vorlichtbögen brannten relativ stabil, wanderten aber um den Isolator, da an der jeweiligen Brennstelle am Porzellanstrunk die Zelluloseschicht bedingt durch den Fußpunkt des Vorlichtbogens abtrocknete. Dieser Effekt ist auch unter realen Bedingungen zu erwarten.

## 3. Test verschiedener Kittsysteme

Nachdem es durch entsprechende Voruntersuchungen gelungen war, die in der Praxis aufgetretenen Phänomene im Hochspannungslabor nachzubilden, wurden gezielte Versuche an Isolatoren mit verschiedenen Kittsystemen durchgeführt. Für diese Versuche wurden beide Stützertypen verwendet.
Nach Zünden der Vorlichtbögen an der unteren und oberen Kittfuge floß bei diesen Isolatortypen und der vorgenommenen künstlichen Verschmutzung ein Ableitstrom von etwa 50 mA. Um stabile Vorlichtbögen zu erhalten, wurde in Abhängigkeit von der Austrocknung der Fremdschicht der Ableitstrom durch Spannungsregelung bis maximal 100 mA (Stützer H 1467) bzw. 200 mA (Stützer StV 20) erhöht. Der Vorgang wurde mehrfach wiederholt, wobei die Zeit, in der ein Vorlichtbogen über der Kittfuge gebrannt hat, aufsummiert wurde. Obwohl z. T. verschiedene Modifikationen der einzelnen Kittmaterialien untersucht wurden, kann sich die Darstellung der Ergebnisse auf die drei bereits genannten grundsätzlichen Materialien beschränken, da bezüglich der Beständigkeit gegenüber stromstarken Vorentladungen keine wesentlichen modifikationsbedingten Unterschiede festgestellt wurden.

**Portlandzement-Kittung (Bild 3)**
Nach etwa 15 min Beanspruchung bildeten sich an einzelnen Stellen Kriechspuren, die sich bei weiterer Beanspruchung stärker ausprägten. Bei den Probeisolatoren wurden nach 1 h mehrere Kriechspuren geringer Tiefe (< 0,5 mm) und einer Breite von 1 bis 2 mm festgestellt, wobei die Kriechstrecken zum Isolatorstrunk hin breiter wurden.

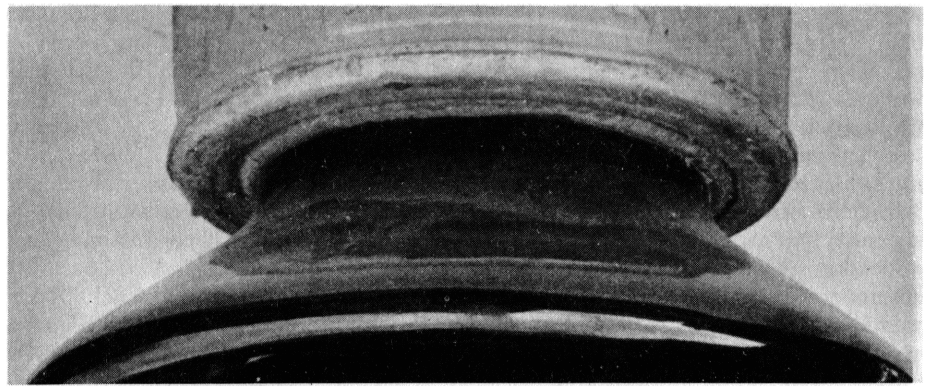
**Schwefelzement-Kittung (Bild 4)**
Nach etwa 1 min Beanspruchung begann der Schwefelzement örtlich zu fließen und kurz danach zu brennen. Nach 20 min waren die Kittfugen etwa 10 mm tief ausgebrannt. Bei einem Probeisolator bewegte sich die obere Armatur ohne äußere Krafteinwirkung und verkantete am Isolatorstrunk. Die Beständigkeit von Schwefelzement gegenüber stromstarken Vorentladungen ist damit unzureichend. Schwefelzement hat eine Schmelztemperatur von $T_s \approx$ 120 °C und eine Entzündungstemperatur von $T_s \approx$ 200 °C. Durchgeführte orientierende Temperaturmessungen mit Hilfe der Thermovisionskamera an den Fußpunkten der Vorlichtbögen ergaben bereits bei relativ kleinen Ableitströmen (< 50 mA) Temperaturen zwischen 250 und 300 °C, so daß die beobachteten Erscheinungen aufgrund der thermisch-physikalischen Eigenschaften zwangsläufig auftreten. Die obere Kittfuge wird bedingt durch das Fließen des Schwefelzementes stärker in Mitleidenschaft gezogen. Bei einigen Versuchen brannte der Schwefelzement auch nach Abschalten der Spannungsquelle weiter. Die Entzündung trat bei vorgeschädigten Kittfugen bereits bei Ableitströmen von 50 mA auf.

**Blei-Antimon-Kittung**
Über der Kittfuge können keine Vorentladungen auftreten. Die Kittung kann elektrisch als Teil der Armatur betrachtet werden. Brannte der Vorlichtbogen am Isolatorstrunk mit einem Fußpunkt auf der Kittfuge, so kam es zur örtlichen Erhitzung am Fußpunkt (bis Rotglut), ohne daß bei den bereits relativ hohen Ableitströmen Erosionserscheinungen auftraten.

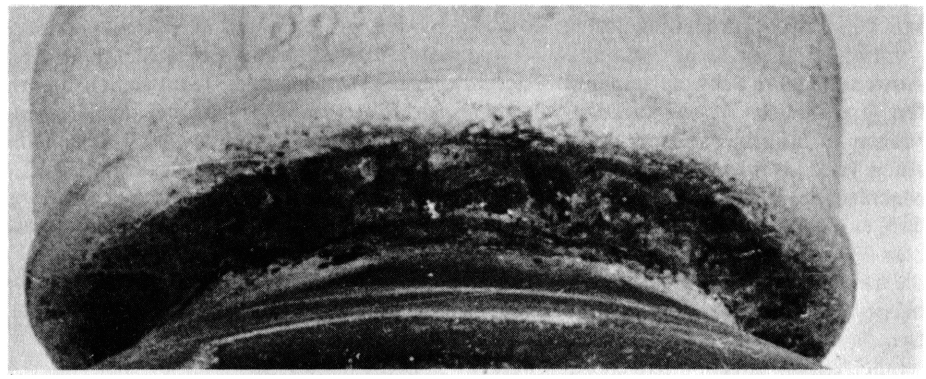
## 4. Erprobung von Kittfugenabdeckungen

Zur Verhinderung des Eindringens von Feuchtigkeit werden die Kittfugen von einigen Herstellern mit einem Schutzanstrich oder mit einer dauerelastischen Versiegelung versehen. Es war zu klären, ob diese Abdeckungen beständig sind gegen die Einwirkung stromstarker Vorentladungen und ob sie das Kittmaterial – insbesondere bei Schwefelzement – gegen die thermischen Wirkungen der Vorentladungen schützen können.

**Bild 4.** Schwefelzementkittung
a) im Neuzustand;
b) nach 10 min Summenbeanspruchung durch Vorlichtbögen mit Ableitströmen von 100...200 mA



a)



b)

**Bild 5.** Schutzüberzug mit Silikonkautschuk auf einer Schwefelzementkittung nach 30 min Summenbeanspruchung durch Vorlichtbögen mit Ableitströmen von 100...200 mA.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden verschiedene Teerepoxidharzanstriche und Silikonkautschukpasten erprobt. Die Abdeckungen wurden auf die gereinigten Schwefelzementkittfugen von Stützern des Typs StV 20 aufgetragen. Die Beanspruchung erfolgte entsprechend der unter 2. beschriebenen Versuchstechnologie mit Ableitströmen von 100...200 mA.

**Schutzanstrich mit Teerepoxidharz**

Der Schutzanstrich wurde bereits durch die ersten Vorentladungen angegriffen und zerstört. Nach etwa 30 min Summenbeanspruchung war kein Unterschied zum Probeisolator ohne Abdeckung mehr vorhanden. Bei einer Modifikation mit Graphitzusatz trat die erwartete Wirkung zunächst ein. Brannte jedoch der Vorlichtbogen mit einem Fußpunkt auf der Abdeckung, kam es zur örtlichen Zerstörung. Nach etwa 30...60 min Summenbeanspruchung war die Abdeckung unwirksam, so daß in der Folge analoge Erscheinungen auftraten wie bei einer ungeschützten Kittfuge.

**Schutzüberzug mit Silikonkautschuk (Bild 5)**

Je nach Konsistenz der verwendeten Pasten hatte die Versiegelung eine Dicke von 1...2 mm. Trotzdem waren nach etwa 30 min Summenbeanspruchung z. T. großflächige Ausbrennungen bis auf die Kittfuge zu verzeichnen. Bei den Probeisolatoren trat trotz Abdekkung der erste Brand des Schwefelzementes nach 45–60 min auf.

## 5. Zusammenfassung

Armierungen mit Portlandzement und Blei-Antimon haben sich als beständig gegenüber stromstarken Vorentladungen mit Ableitströmen bis 200 mA erwiesen. Bei Schwefelzementkittfugen konnten die im Netzbetrieb an Standorten mit hoher Umweltbelastung beobachteten Erosionserscheinungen und Ausschmelzungen im Labor nachvollzogen werden. An vorgeschädigten Kittfugen trat eine Entzündung des Schwefelzementes durch Vorentladungen bereits bei Ableitströmen um 50 mA auf.

Die untersuchten Abdeckungen haben sich für den Schutz von Schwefelzementkittfugen vor stromstarken Vorentladungen als nicht bzw. nicht ausreichend beständig erwiesen.

In Gebieten mit hoher Umweltbelastung grundsätzlich Isolieranordnungen mit Portlandzement- oder Bleikittungen anwenden. Für die Vielzahl bestehender Isolieranordnungen mit Schwefelzementkittungen an gefährdeten Standorten können Störungen durch die z. Z. verwendeten Schutzabdeckungen nur hinausgezögert werden, so daß die Suche nach beständigen Abdeckmaterialien (z. B. metallische Lacke) fortgesetzt werden muß.

Die Versuche wurden im Hochspannungslabor der TH Zittau durchgeführt. Dank gilt den Elektrokeramischen Werken Sonneberg und der Margarethenhütte Großdubrau für die Bereitstellung der Testisolatoren.

**Literatur**

[1] *Pilling, J.:* Verhalten von Geräteporzellanen bei extrem leitfähigen Fremdschichten. ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 12, S. 486–489
[2] *Hecht, A.:* Elektrokeramik – Werkstoff, Herstellung, Prüfung, Anwendungen. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag, 1976
[3] *Böhme, W.:* Konstruktionsmerkmale der Langstabisolatoren. Hermsdorfer Technische Mitteilungen (1970) 28, S. 868–870
[4] *Mosch, W.;* u. a.: Hochspannungsisoliertechnik in: *Philippow, E.:* Taschenbuch Elektrotechnik, Bd. 6. Berlin: Verlag Technik Berlin, 1982

EA 6196

## $SF_6$-isolierte Lastschaltanlagen für Netzstationen, aber auch für Sonderabnehmeranlagen

Der Einsatz von $SF_6$-isolierten Lastschaltanlagen in EVU-Verteilungsnetzen des In- und Auslands mit unterschiedlichen Anforderungen war nur durch Vielfalt in der technischen Gestaltung möglich. Der Verfasser stellt den erreichten Stand anhand der GA 24-Anlage der **Felten & Guilleaume Energietechnik Aktiengesellschaft** vor.

### 1. Anreihen und Erweitern

Während luftisolierte Schaltanlagen aus Einzelfeldern mit gegebenenfalls unterschiedlicher Ausrüstung aufgebaut werden, herrscht bei $SF_6$-Lastschaltanlagen die Blockbauweise vor.
Dies hat weniger Dichtungen zur Folge und läßt eine stabilere Transporteinheit entstehen.
Die GA 24-Anlage ist serienmäßig mit 3 oder 4 Lasttrennschaltern lieferbar – Bild 1.
Die beiden linken Schalter sind immer als Kabelschalter ausgebildet, während der 3. und ggf. 4. Schalter als Kabel- oder Trafoschalter mit Freiauslösung ausgeführt werden kann.
Aufgrund des Aufbaus können die rückwärtig übereinander angeordneten Sammelschienen auf seitliche Durchführungen herausgeführt werden.
Diese erlauben eine Direktkupplung oder die Ausbildung einer Längstrennung. Ebenfalls kann eine Kabelverbindung über Stecker ausgeführt werden – Bild 2.
Weiter ist die Einbindung eines Meßfeldes möglich, daß mit Spezialwandlern ausgestattet ist, deren Mittelspannungsanschlüsse $SF_6$-isoliert sind, während die Sekundär-Umschaltung und alle anderen Anschlüsse nach Entfernen der Frontabdekkung zugänglich sind – Bild 3.
Während in Netzstationen der 3- oder 4-feldrige Block als Standardlösung zu sehen ist, erlaubt die Anreihung von Blöcken das Errichten größerer Einheiten.
Die Direktkupplung ist so ausgebildet, daß bauseitige Maßabweichungen ausgeglichen werden können.
Die Isolierung ist mit Aufschiebeelementen aus Silikonkautschuk ausgeführt, so daß nicht mit $SF_6$-Gas auf der Baustelle hantiert werden muß. Die Blechabdeckung der Kupplung behält die einphasige Kapselung des ganzen Systems bei.

### 2. Sicherungsbau und Erder

Für die Kapselung der HH-Sicherung des Trafoabgangs wurde eine eigenständige Lösung erarbeitet, welche die sehr guten Erfahrungen mit Silikon-Aufschiebeelementen nutzt.
Durch die elektrisch sehr hochwertigen Fugen der Aufschiebeelemente entsteht gleichzeitig auch eine Dichtigkeit gegen Wasserdruck, die bei Überflutung der Anlage vorübergehenden Betrieb zuläßt.
Das untere Steckelement der Sicherungskapselung ist zugleich Aufschiebe-Endverschluß für das Trafokabel, so daß für die Installation ein Satz Stecker weniger benötigt wird.
Der Anbau der Sicherungen vor der Anlage läßt erwarten, daß beim Versagen der HH-Sicherungen oder bei Beaufschlagung mit unzulässigen Strömen, die eine Zerstörung der HH-Sicherung zur Folge haben, die Anlage selbst unbeschädigt bleibt.
Durch die Ausbildung aller Lasttrennschalter als Dreistellungsschalter mit den Positionen ‚EIN' – ‚AUS' – ‚GEERDET' ist die Erdung der Sicherung auf der Speiseseite immer vorhanden. Dies ist um so wichtiger, als die Trennstrecke des Schalters nicht sichtbar ist und keine Einschubplatte wie bei luftisolierten Feldern verwendet werden kann. Wird das Niederspannungs-Netz hinter dem Trafo als Insel betrieben, genügt die Erdung des MS-Trafokreises an einer Stelle, ggf. kann eine Erdung auf der NS-Seite vorgenommen werden.
Im Regelfall wird jedoch heute zumeist ein zweiter Erder eingebaut, der das Trafokabel erdet. Dadurch ist die HH-Sicherung dann doppelseitig geerdet.
Dieser Erder ist ebenfalls unter $SF_6$ ange-

**Bild 1.** $SF_6$-isolierte Lastschaltanlage Typ GA 24, 3feldrig, 2 Kabelfelder und 1 Trafofeld

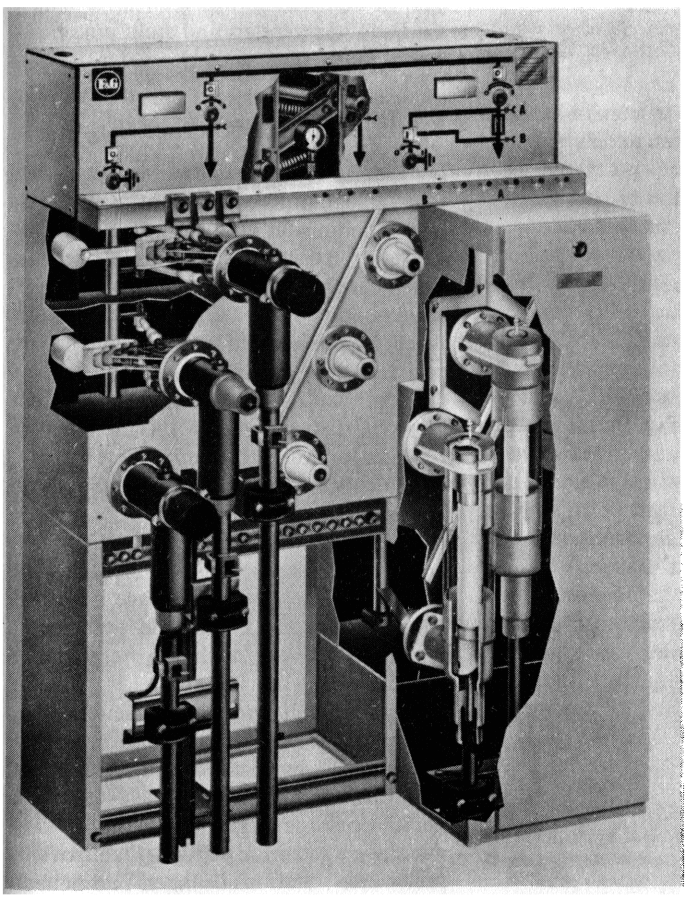
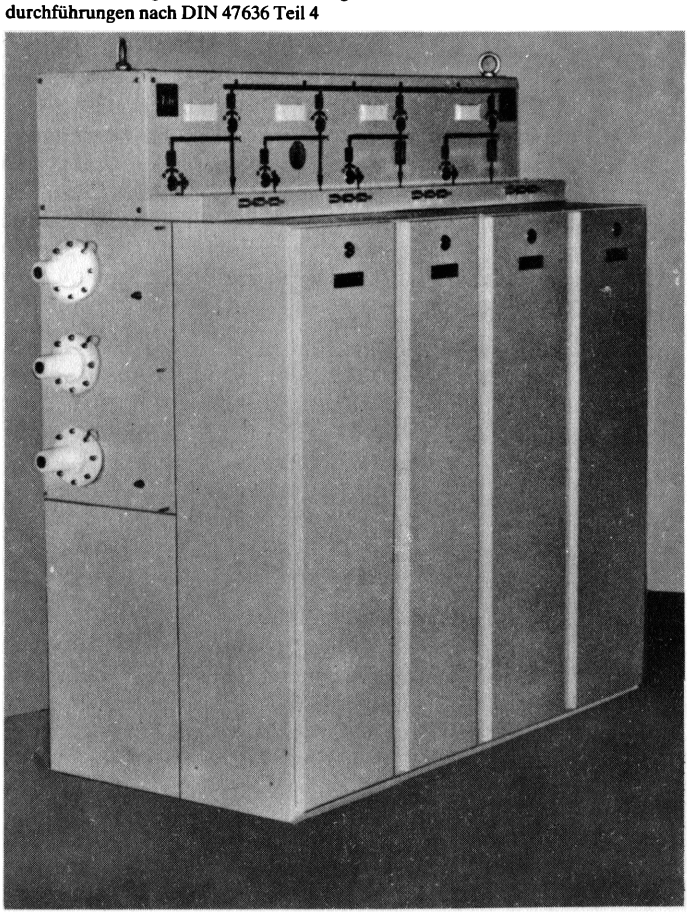


**Bild 2.** Schaltanlage mit nach links herausgeführter Sammelschiene auf Außenkonusdurchführungen nach DIN 47636 Teil 4



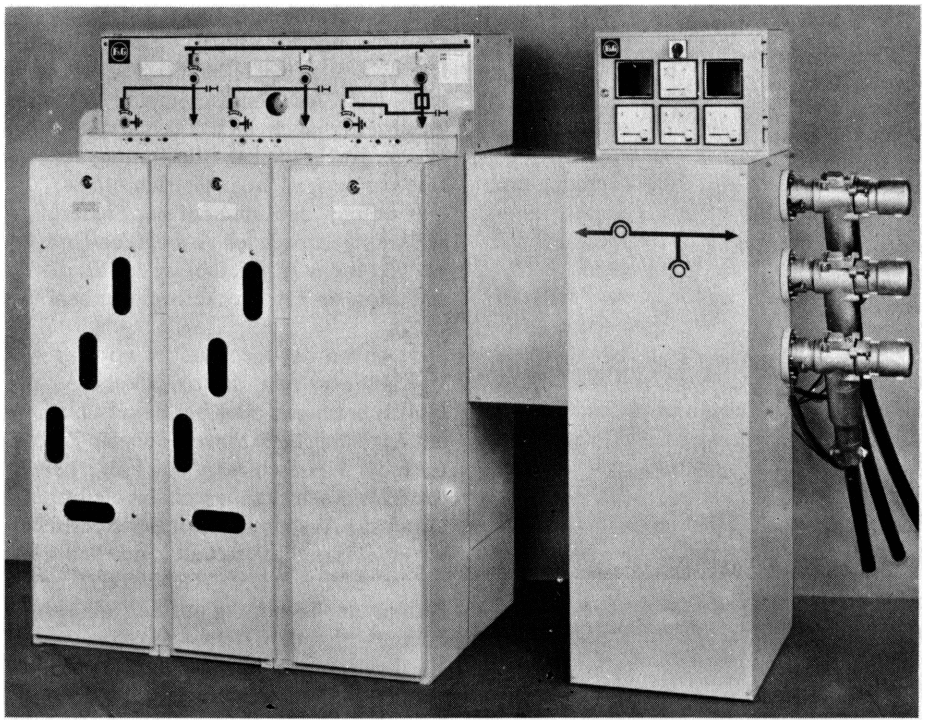


**Bild 3.** Dreifeldige GA 24-Anlage mit angeflanschtem Meßfeld (Sammelschienenkupplung)

ordnet und wird von der gemeinsamen Schaltwelle des Gerätes angetrieben. Er ist für die höchste denkbare Rückspeiseleistung des Trafos ausgelegt.

## 3. Kabelanschlußtechnik

Für den Anschluß der Ringkabel stehen Stecker nach DIN VDE 0278 Teil 6 im Außenkonus-System zur Verfügung. Das Außenkonus-System ist weltweit verbreitet und hat sich in millionenfachem Einsatz unter schwierigsten Bedingungen bewährt. Es setzt jedoch Einleiter-Kunststoffkabel mit Einzelschirmung voraus. Bei Dreileiter-Kabeln mit Sektorleitern ist die Form des isolierten Leiters maßgebend.

Nur wenn dieser ausreichend ballig ist, kann Aufschiebetechnik verwendet werden. Für andere Kabelbauweisen sind Stecker nicht verwendbar. Zum Anschluß von Massekabeln werden daher häufig Übergangsmuffen verwendet.

Es ist jedoch bei der GA 24 auch möglich, Massekabel direkt anzuschließen für 10 kV wie auch für 20 kV. Hierzu werden vorhandene Endverschlüsse mittels Silikonadapter auf die Durchführungen gebracht. Dieser Silikonadapter umkleidet den Anschlußpunkt vollständig und lichbogenfußpunktfrei. Die Klimafestigkeit des Endverschlusses wird dadurch erheblich gesteigert, wie Salznebeltests bewiesen haben. Der Adapter kann zu Kabelprüfzwecken geöffnet werden – natürlich ohne Kabeldemontage. Da diese Anordnung jedoch nicht berührungssicher sein kann, ist eine feldweise Blechabdeckung vorgesehen, deren Tür nur bei eingelegtem Erdungsschalter geöffnet werden kann – Bild 4.

Das für Massekabel vorgesehene Adapter-System läßt sich natürlich auch für Kunststoffkabel anwenden und stellt eine preiswerte Alternative zu Steckern dar.

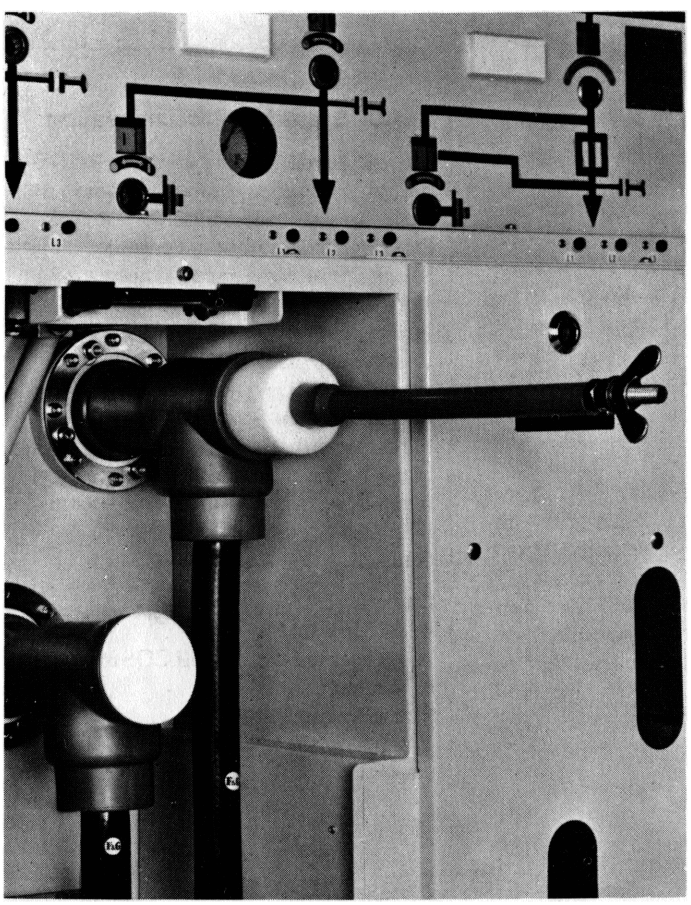


**Bild 4.** Prüfadapter für Massekabelendverschluß Typ SKV für 12 kV

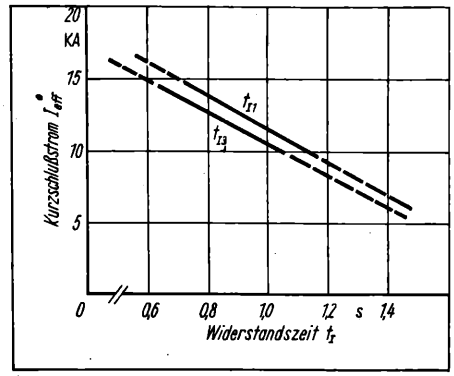



**Bild 5.** Widerstand gegen Durchbrand bei inneren Fehlern
$t_{r1}$: einpoliger Lichtbogenfehler im Tank
$t_{r3}$: dreipoliger Lichtbogenfehler im Tank

## 4. Störlichtbogensicherheit

Die GA 24 ist die einzige $SF_6$-isolierte Lastschaltanlage mit einphasiger Kapselung. Die ohnehin sehr gute Isolierfestigkeit gekapselter, gasisolierter Anlagen wird dadurch noch gesteigert, da innere Erdschlüsse nicht zu Kurzschlüssen führen. Auch Doppelerdschlüsse mit einem Erdpunkt in der $SF_6$-Anlage greifen nicht auf die gesunden Anlagenteile über [1].

Obwohl dadurch die Wahrscheinlichkeit 3poliger innerer Fehler minimiert ist, wurden doch Versuche mit 3poligem Störlichtbogen durchgeführt.

Durch hohe Druckfestigkeit des Gehäuses und gezielte Verstärkung der Seitenwände wurde erreicht, daß die Anlage bei 10 kA Kurzschlußstrom 1 Sekunde geschlossen bleibt, bei 15 kA noch 0,6 Sekunden – Bild 5.

Nach dieser Zeit brennen die Seitenwände durch. Wenn die Netzdaten und die Staffelzeiten des Reserveschutzes in diesem Rahmen bleiben, braucht für die Netzstation keine Vorsorge gegen Störlichtbogenauswirkungen getroffen werden. Dadurch sind preiswerte Stationslösungen erreichbar.

Für Netze größerer Kurzschlußleistung und längerer Kurzschlußdauer wird eine Berstsicherung eingebaut, die bei Überlastung an definierter Stelle öffnet. Hiermit ist beispielsweise eine Betonstation – mit offenen Türen des MS-Raumes – erfolgreich für 20 kA 1 Sekunde geprüft worden.

### 5. Fernsteuerung

Die Möglichkeit, mehrere Blöcke zu größeren Einheiten zu kuppeln, eröffnete ein größeres Anwendungsspektrum. Hierbei war der Wunsch nach Fernsteuerung sehr häufig, z. B. bei Verwendung als Netzknotenpunkt oder als Einspeisestation für Sonderabnehmer.
Diesem Wunsch wurde durch einen neu vorgestellten Hydraulikantrieb entsprochen. Dieser erlaubt die Fernbetätigung auch vieler Schaltfelder, hat bei Ausrüstung mit einem Hydraulikspeicher aber auch die Möglichkeit, diverse Schaltungen bei ausgefallener Spannungsversorgung auszuführen – Bild 6.

**Bild 6.** Vierfeldige $SF_6$-Schaltanlagen auf gemeinsamen Grundrahmen mit Kabelverbindung
a) Gemeinsamer Hydraulik-Antrieb mit acht Ventilen zur wahlweisen Betätigung aller acht Schalter


**Literatur**

[1] Dirks, R.: Elektrische Fehler und Schadensverläufe in $SF_6$-isolierten Mittelspannungs-Lastschaltanlagen. Elektrizitätswirtschaft 85 (1986) 7


### Thyristor-Leistungssteller für stetige Ansteuerung

Einsatzbereiche für Thyristor-Leistungssteller sind überall dort, wo größere ohmsche und induktive Lasten zu schalten sind, z. B. im Industrieofenbau und bei der Kunststoffverarbeitung. Durch den modularen, kompakten Aufbau und die Ansteuerung mit einem stetigen Eingangssignal werden die JUMO Thyristor-Leistungssteller zum perfekten Stellorgan für die industrielle Leistungsregelung.
Das Leistungsteil besteht aus zwei antiparallel geschalteten Thyristoren, dem isolierten Kühlkörper und der Steuerelektronik. Die Thyristor-Leistungssteller mit den Abmessungen 110 × 195 × 152 mm können mit einer Montageplatte direkt an der Wand montiert oder auf eine 32 mm Trageschiene aufgeschnappt werden.
Je nach Ausführung arbeiten sie im Phasenanschnittbetrieb mit einstellbarer Strombegrenzung oder im Impulsgruppenbetrieb. Beim Impulsgruppenbetrieb werden stets nur vollständige Sinuswellen geschaltet. Dadurch ist sichergestellt, daß keine Gleichstromanteile auftreten bzw. Blindleistung erzeugt wird. Durch eine Eingangssignalabschwächung kann der Regelbereich eingeengt und über ein externes Potentiometer eine Grundlast eingestellt werden. Im Impulsgruppenbetrieb ist für eine Mehrphasenlast eine Sparschaltung möglich.

Weitere Informationen:
M. K. Juchheim GmbH & Co.
Postfach 1209
W–6400 Fulda
Nach: Presse-Information Nr. 655
Die Redaktion EK 4349

## FACHTAGUNGEN

### INSUCON '90

6th Beama International Insulation Conference
conference papers now available

The Conference papers for the 6th BEAMA International Insulation Conference are now available.
The Conference, considered to be the premier event of electrical insulating industry attracts participants from most of the major countries of the world. Inaugurated in 1970 and held every four years, the event, this year, attracted some 220 delegates from 23 nations. Sixtyeight papers were presented allowing an opportunity for ample discussion of latest developments, especially those in the field of insulation for the electrical and electronics industry.
The Conference was arranged into ten non-parallel sessions over a $2^1/_2$-day period between 21–24 May, two of the sessions featured, for the first time, papers specially selected for additional presentation at a poster session; each of these papers being communicated at the Conference by a Rapporteur, assisted by the individual authors. The Conference publication, (356 pages) giving a printed version of each of the papers presented is now available, price £ 65.00 (postage and packing extra). Orders, accompanied by the appropriate sterling remittance, should be forwarded to the Publicity Department, BEAMA, 8 Leicester Street, London WC2H 7BN, England. (Telephone: 071-437 0678 Telefax: 071-437 4901).[1)]

[1)] Postage and Packing Rates:
UK £ 5.00; Europe £ 10.00;
Rest of the World £ 10.00
surface mail, air mail by quotation

Further editorial enquiries
Michael Burkert
BEAMA
8 Leicester Street
London WC2H 7BN
Telephone: London (01) 872 6243 Direct Line
Telex: 263536
Telefax: (01) 437 4901

Nach: Presse-Information
Die Redaktion EK 4311

### SERCOS interface-Dokumentation

Wie die Fördergemeinschaft SERCOS mitteilt, ist soeben die mehrere hundert Seiten umfassende SERCOS interface-Dokumentation über die digitale Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Steuerungen und Antrieben in numerisch gesteuerten Maschinen erschienen. SERCOS interface ist eine vom ZVEI/VDW-Arbeitskreis Werkzeugmaschinen-Schnittstelle vereinbarte Spezifikation über Übertragungsmedium, Topologie, Anschlußtechnik, Signalpegel, Prozeduren, Telegramminhalte, Datenformate und Wichtungen.

Preis: DM 1000,–
Bestellanschrift:
Fördergemeinschaft SERCOS interface e. V. Geschäftstelle
Stresemannallee 19
W–6000 Frankfurt am Main 70
Nach: Pr–34/90 (ZVEI) EK 4354
Die Redaktion

## Dokumentation

*Schwirklies, W.; Ambrosch, H.; Jäger, J.; Veuhoff, F.-W.*
**Anforderungen an das Schaltvermögen von Trenn- und Erdungsschaltern in Hochspannungs-Freiluftschaltanlagen**
*ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S. 444–447, 7 Bilder, 1 Tafel, 6 Gln., 7 Lit.
Der Beitrag beschreibt die Durchführung von Untersuchungen zur elektrischen Belastung der Trenn- und Erdungsschalter beim Öffnen und Schließen. Damit verbunden war eine kritische Bewertung der entsprechenden ICE-Prüfvorschriften, ein Beitrag zur Auswahl angebotener Geräte und zur auftretenden Störbeeinflussung in einer 220-kV-Schaltanlage.

*Krause, D.*
**Ultraschalldiagnose an Langstabisolatoren und Geräteporzellanen zur Früherkennung von Porzellanfehlern im Bereich der Armierung**
*ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S. 447–450, 4 Bilder, 4 Gln., 5 Lit.
Die Ultraschalldiagnose, ein Verfahren zur Erkennung gefährdeter Isolatoren, wird bei der Prüfung von Langstabisolatoren im Aufsatz behandelt.

*Berthold, St.; Bauer, H.*
**Schaltgeräteorientierte und pfadorientierte Schaltfehlerschutzsysteme für Hochspannungs-Schaltanlagen**
*ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S. 450–455, 5 Bilder, 3 Tafeln, 3 Lit.
Ausgehend von einem Vergleich realisierter Schaltfehlerschutzapplikationen werden die Anforderungen analysiert und Vorteile eines pfadorientierten Schaltfehlerschutz-Algorithmus begründet. Dabei bleiben Fragen des Aufbaus und der Inbetriebnahme spezieller Anwendungen ausgespart.

*Bäsel, G.; Feist, D.; Hühr, L.*
**Neuer Schaltfehlerschutz in der 220-kV-Schaltanlage Lubmin**
*ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S. 456–462, 5 Bilder, 2 Tafeln, 10 Lit.
Der bisherige elektro-pneumatische Schaltfehlerschutz der 220- und 380-kV-Schaltanlagen Lubmin ist durch neuen Schaltfehlerschutz auf Mikrorechnerbasis zu ersetzen. Die vorliegende Arbeit beschreibt den neuen Schaltfehlerschutz der 220-kV-Anlage.

*Bauer, H.; Diessner, A.; Schwirkslies, W.*
**Störbeeinflussungsmessungen an Steuerkabeln einer 220-kV-Schaltanlage zur Abschätzung der EMV beim Einsatz mikroelektronischer Geräte**
*ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S. 463–469, 12 Bilder, 1 Tafel, 2 Gln., 18 Lit.
Die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Schaltfehlerschutzes, basierend auf mikroelektronischen Schaltungen, setzt die Beherrschung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) voraus. Um die EMV einschätzen zu können, wurde die Störbelastung in der Schaltanlage an den Schnittstellen zwischen den Steuerkabeln und den elektronischen Geräten gemessen.

*Ambrosch, H.; Ebner, M.*
**Elektrische Belastung der Schaltstreckenisolierung von Hochspannungs-Leistungsschaltern im ausgeschalteten Zustand**
*ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S. 470–474, 6 Bilder, 3 Tafeln, 8 Gln., 14 Lit.
Der vorliegende Aufsatz beinhaltet Überlegungen zur Bemessung der Schaltstreckenisolierung von Leistungsschaltern. Es wird davon ausgegangen, daß eine Unterscheidung der Leistungsschalter nach ihrem Einbauort im Netz und nicht nach der Schaltgerätenennspannung erfolgen muß.

*Zedler, H.-D.; Pliet, H.; Schramm, H.-H.*
**Prüfung von $SF_6$-Leistungsschaltern bei extremer Spannungsbelastung**
*ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S. 475–477 und 480, 7 Bilder, 3 Tafeln
Im Beitrag werden Untersuchungen zum Leistungsschalter der Siemens AG vom Typ 3AQ2 mit Schaltgerätenennspannungen von 245 kV und 420 kV ausgewertet.

*Grabner, U.; Sidorf, W.; Eggert, H.*
**Austausch von Schaltgeräten 245 kV und 420 kV**
*ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S. 481–485, 7 Bilder
Es wird über Erfahrungen beim Austausch der Druckluft gegen $SF_6$-Leistungsschalter und Trennschalter mit Druckluftantrieb gegen solche mit Motorantrieb berichtet.

*Pilling, J.; Kynast, E.; Berndt, L.*
**Zur Dimensionierung von Isolatoren für Hochspannungsgeräte unter Fremdschichteinfluß**
*ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S. 486–489, 6 Bilder, 4 Gln., 10 Lit.
Im Beitrag wird über Probleme des experimentellen Nachweises des Fremdschichtisoliervermögens berichtet. Das Isoliervermögen der Isolierungen von Hochspannungsgeräten wird für den überwiegenden Teil der im Bereich auftretenden Beanspruchungen in standardisierten Prüfungen nachgewiesen.

*Ambrosch, H.; Gorgius, D.*
**Einfluß von stromstarken Vorentladungen auf Kittsysteme von Freiluftisolatoren**
*ELEKTRIE*, Berlin 44 (1990) 12, S. 489–492, 8 Bilder, 3 Lit.
Im Beitrag wird über die Ergebnisse von Laboruntersuchungen zu Erosionserscheinungen und zu Störungen an Kittsystemen von Isolieranordnungen berichtet.
Für die Vielzahl der bestehenden Isolieranordnungen mit Schwefelzementkittungen an gefährdeten Standorten ist die Suche nach beständigen Abdeckmaterialien fortzusetzen.


## ELEKTRIE

| | |
|---|---|
| Verlag | Verlag Technik GmbH<br>Oranienburger Straße 13/14,<br>Postfach 201<br>O-1020 Berlin<br>Bundesrepublik Deutschland<br>Telefon: 28700,<br>Telex: 0112228 techn dd<br>Telefax: 2870259 |
| Geschäftsführer<br>Verlagsleiter | Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus* |
| Zeitschriften | Dipl.-Ök. *Günter Fitzner* |
| Redaktion | Dr.-Ing. *Klaus Heide*, Chefredakteur (Telefon: 2870345)<br>Dipl.-Ing. *Fritz Heinecke*, Redakteur (Telefon: 2870343)<br>*Roland Lüders*, redaktioneller Mitarbeiter (Telefon: 2870344) |
| Gestaltung | *Ursula Maria Lange* |
| Anzeigenannahme | Anzeigenabteilung<br>Anschrift siehe Verlag<br>Telefon: 2870309 oder 2870291<br>Telefax: 2870254<br>Anzeigenpreisliste 1 |
| Gesamtherstellung | Leipziger Verlags- und Druckereigesellschaft mbH, |
| Erscheinungsweise | monatlich 1 Heft |
| AN (EDV) | 6730 |
| Bezugspreise | 8,00 DM, Abonnementpreis vierteljährlich 24,00 DM<br>Der Abonnementpreis erhöht sich für das Ausland um die Zustellgebühren. Das Abonnement verlängert sich automatisch um den bestellten Zeitraum, wenn es nicht 6 Wochen vor Ablauf der Frist bei der Bestelladresse schriftlich gekündigt wird. |
| Bezugsmöglichkeiten | Bestellungen sind an den Verlag zu richten. Abonnementsbestellungen für die westlichen Länder der BRD und das westliche Ausland nimmt entgegen<br>Inter abo · Betreuungs-GmbH<br>Wendenstraße 26, Postfach 103245<br>W-2000 Hamburg 1,<br>Bundesrepublik Deutschland<br>Interessenten in Österreich übergeben ihre Bestellung der Firma Hartleben, Dr. *Rob*, Buchhandlungen Schwarzenbergstraße 6, A-1015 Wien |



Für unsere neuen Leser:

- **Jahresabo- ein Vorteil, den Sie nutzen sollten**
- **Wir senden jedes Heft direkt und schnell an Sie**
- **Sie nutzen den Zeit- und Preisvorteil**

Jahresabonnement (nur für Leser in den westlichen Ländern der Bundesrepublik Deutschland), zwölf Hefte ELEKTRIE zum Preis von 96,00 DM.

Bitte liefern Sie ☐ ab sofort ☐ ab

Name: Telefon:

Straße: Tätigkeit:

PLZ/Ort: Datum/Unterschrift:

Die Abonnementbestellung kann innerhalb von 10 Tagen schriftlich widerrufen werden. Es genügt während dieser Frist auch eine Mitteilung an die Verlag Technik GmbH. Diesen Hinweis habe ich zur Kenntnis genommen und bestätige dieses durch meine 2. Unterschrift.

Datum Unterschrift

**Verlag Technik GmbH**

**Redaktion Elektrie**

**Oranienburger Straße 13/14**
**O - 1020 Berlin**

# ABB Antriebstechnik – der Schlüssel zum erfolgreichen Maschinen- und Anlagenbau!

ABB ist ein internationaler Elektro-Konzern mit 220 000 Mitarbeitern in 140 Ländern. In der Sparte Industrie und Automation bilden elektrische Antriebe einen wichtigen Schwerpunkt.

Elektrische Antriebe von ABB Drives sind weltweit in über 250 000 Maschinen und Anlagen im Einsatz.

*ABB Drives* liefert für jede gestellte Antriebsaufgabe die passende Lösung. Sei es bei der Ausrüstung neuer Maschinen/Anlagen oder der Modernisierung bestehender Einrichtungen.

Unser Programm umfaßt Gleichstrom-, Drehstrom- und Servoantriebe in einem Leistungsbereich von 0,5 kW bis 25 MW:

- ○ Gleichstromantriebe mit Stromrichtern in analoger oder digitaler Technik
- ○ Drehstromantriebe mit digitalen Puls- oder Stromzwischenkreis-Umrichtern
- ○ Servoantriebe in Gleichstrom- oder bürstenloser Technik.

*ABB Drives*-Antriebe erhöhen die Wirtschaftlichkeit, helfen Energie sparen, verbessern die Produktqualität, schonen Material und Maschine/Anlage, minimieren den Wartungsaufwand.

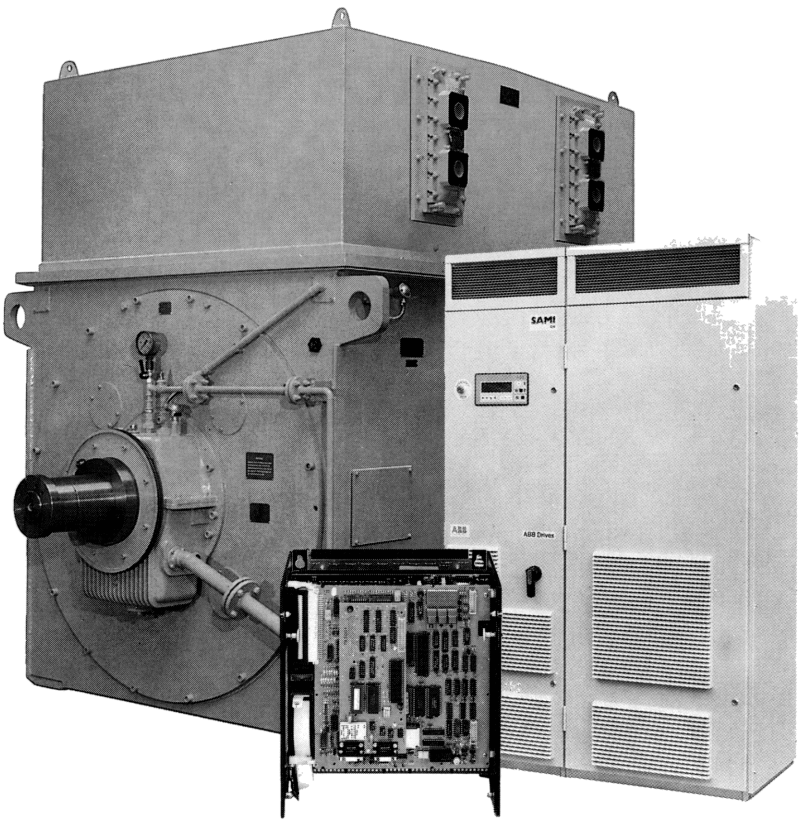
Kundennähe ist für *ABB Drives* eine Selbstverständlichkeit. Unsere Mitarbeiter von der Niederlassung Berlin betreuen den Markt Mecklenburg, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Sachsen und Thüringen:

– mit individueller Beratung und Unterstützung vor Ort

– mit kurzen Bearbeitungszeiten bei der Projektierung, Angebotserstellung und -abwicklung.

*ABB Drives* ist der starke, kompetente Partner für Industrie, Ingenieur-Büros, Forschung und Lehre.

Nutzen Sie unser Angebot, fordern Sie weitere Informationen an:



Ich interessiere mich für Antriebe von ABB Drives. Senden Sie mir bitte Informationen über

☐ Gleichstromantriebe ☐ Drehstromantriebe ☐ Servoantriebe

☐ Ich wünsche ein Beratungsgespräch, bitte setzen Sie sich mit mir in Verbindung.

Name: _____ E

Firma: _____

Abt.: _____ Funktion: _____

Straße: _____

Ort: _____ Tel.: _____

Anwendung: _____

ABB Antriebstechnik GmbH
Niederlassung Berlin
Hans-Beimler-Straße 91–94
Telefon 0 03 72 / 4 37 17 34
DDR-1017 Berlin

ASEA BROWN BOVERI

D ANT 6026 90 D

ISSN 0013–5399
ELEKTRIE · Berlin 44 (1990) 12 · S. 441–496

6730 12 177 027 465
KOMB KERAM WERKE
8612 7001 0136 PF 1

Klöckner MOELLER

Jetzt auch in Berlin, Chemnitz, Dresden, Erfurt und Leipzig.

# Auf Sicherheit schalten

Besuchen Sie uns:
belektro '90, Berlin
28.11.–1.12.90
Halle 9b, Stand 9b.01

Zum Beispiel PKZ: drei Buchstaben für Leistung. Diese Typenbezeichnung von Klöckner-Moeller ist zum Oberbegriff für Motorschutzschalter überhaupt geworden. Technische Höchstleistungen auch im Detail – das macht seit mehr als 90 Jahren den Erfolg unserer Produkte aus. Denn sicher schalten und zuverlässig schützen sind Voraussetzungen für ein langes Maschinenleben.
Klöckner-Moeller ist der gefragte Partner in der Elektrotechnik – weltweit. In mehr als 70 Ländern leisten unsere rund 400 Vertriebsbüros Beratung und Service vor Ort. Jetzt auch in ganz Deutschland.

| | |
|---|---|
| **Befehlen und Melden** | **Energie verteilen** |
| **Auto-matisieren** | **Schalten und Schützen** |

☒ Ja, bitte senden Sie mir Ihre Vertriebsadressen und weitere Informationen über Klöckner-Moeller

90/41Kc

Vor-/Zuname

Firma

ehemalige Firmenbezeichnung

Branche

Straße

Ort

**Klöckner-Moeller · Postfach 1880 · D-5300 Bonn 1**